

Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Велькин В. И.

**ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ УДАЛЕННОГО ОБЪЕКТА
НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ КЛАСТЕРА ВИЭ**

Екатеринбург
УрФУ
2013

УДК 620.9
ББК 31.19
В28

Рецензенты:

зав. кафедрой энергетики Уральского государственного лесотехнического университета, проф., д-р техн. наук С. М. Шанчуров;
зав. кафедрой информационных технологий и естествознания Екатеринбургский филиал НОУ ВПО «Московский институт предпринимательства и права» проф., д-р хим. наук И. В. Мурыгин

Научный редактор – проф., д-р техн. наук С. Е. Щеклеин

Велькин, В. И.

В28 Энергоснабжение удаленного объекта на основе оптимизации кластера ВИЭ : монография / В. И. Велькин. – Екатеринбург : УрФУ, 2013. – 100 с.

ISBN 978-5-321-02309-9

В монографии представлена разработка методологии и классификации кластеров ВИЭ, создание алгоритма и методики расчета, а также их экспериментальная апробация.

Данный материал может представлять интерес для научных работников, студентов, аспирантов, а также предпринимателей, занимающихся вопросами развития, внедрения, эксплуатации и обслуживания оборудования возобновляемых источников энергии.

Библиогр.: 45 назв. Рис. 26. Табл. 18.

УДК 620.9
ББК 31.19

ISBN 978-5-321-02309-9

© Уральский федеральный
университет, 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕАМБУЛА.....	5
Глава 1. ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА В МИРЕ И В РОССИИ.....	15
1.1. Современное состояние и перспективы развития возобновляемой энергетики в России	17
1.2. Монокомплексы ВИЭ в мире	19
1.3. Опыт эксплуатации комплексных систем ВИЭ за рубежом.....	20
1.4. Краткий анализ исследований комплексных систем ВИЭ в России.....	22
1.5. Проблемы энергообеспечения удаленных поселений в Свердловской области.....	29
1.6. Краткие выводы и постановка задач исследования	33
Глава 2. РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ОБЪЕКТА «ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ДОМ» ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ КЛАСТЕРНЫХ СИСТЕМ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВИЭ	37
2.1. Организационно-правовые аспекты осуществления проекта «Энергоэффективный дом» в Уральском федеральном округе	38
2.2. Технические решения при реконструкции заброшенного объекта и его реабилитации в комфортное сельское жилье	39
2.3. Расчет термических сопротивлений ограждающих конструкций «Энергоэффективного дома»	42
2.3.1. Расчет теплопотерь через ограждающие конструкции объекта «Энергоэффективный дом»	48
2.3.2. Расчет тепловых потерь ограждающих конструкций квартир	49
2.4. Организация штатного энергоснабжения объекта «Энергоэффективный дом»	56

2.5. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии на объекте «Энергоэффективный дом»	59
Глава 3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОГО КЛАСТЕРА ВИЭ.....	61
3.1. Разработка классификации кластеров ВИЭ по доле замещаемой мощности.....	63
3.2. Математическая модель для оптимизации кластера ВИЭ.....	69
3.3. Безрисковый и рискованные источники энергии кластера ВИЭ.....	73
3.4. Постановка и решение задачи поиска оптимального кластера ВИЭ.....	74
3.5. Разработка компьютерной программы расчета оптимального кластера ВИЭ с использованием модуля «Поиск решения»	83
3.6. Разработка модульных микро-кластеров ВИЭ высокой заводской готовности	86
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	91
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	95

ПРЕАМБУЛА

Кластер в переводе с англ.(cluster) – группа объектов, обладающих общими признаками. В последнее время использование экономических теорий вкупе с термином «кластер» стало в России настолько распространенным, что термин «кластер» употребляется, зачастую, без всякой конкретной привязки к первоначальному смыслу. Кластеры «алюминиевые», «энергетические», «культурные», «социальные» и другие имеют, как правило, территориально-отраслевую принадлежность, экономическую теорию или социальную направленность, однако конкретно никак не классифицируются ни по одному параметру (группы, виды, классы).

Разработка теории и классификации кластеров ВИЭ (возобновляемых источников энергии) столкнулась с возражениями о «непатриотичности термина» со стороны ряда специалистов-энергетиков (использование иностранного слова), разработчиков экономических теорий и промышленно-территориальных образований (алюминиевый кластер – реальность, а кластер ВИЭ – лишний неологизм). В этой связи целесообразно привести ряд определений «кластера» из разных источников и словарей, в которых нет привязки ни к одному конкретному виду промышленности или типу отрасли.

1. Кластер – объединение в систему однородных единиц. При этом данная система может считаться самостоятельным элементом, обладающим определёнными свойствами.

2. Кластер – группа объектов, выделенная с помощью одного из методов кластерного анализа по формальному критерию их близости друг к другу. При таком анализе переменных – группа переменных, выделенных по критерию высокой корреляции друг с другом.

3. Кластер – структурная часть генеральной совокупности.

4. Кластер – элементы множества со схожими характеристиками, или параметрами, собранные в одну группу.

5. Кластер в факторном математическом анализе – группа переменных, имеющих корреляции друг с другом выше, чем с другими переменными.

6. Кластер – любая группа объектов или явлений, которые субъективно воспринимаются как принадлежащие одному классу, составляющие естественную группу [1].

Под любое из вышеперечисленных определений подпадает и предлагаемый подход к кластерам ВИЭ, при условии их классификации.

Цель данной монографии – представить теоретические основы, классификацию и методику расчета кластера ВИЭ как энергетически взаимосвязанной единицы, с учетом различных сочетаний видов источников энергии и характеризующегося определённым уровнем установленной мощности для использования на удаленных децентрализованных объектах.

Россия – страна с огромными территориями, значительная часть которых имеет относительно небольшой удельный потенциал возобновляемых источников энергии в силу значительных территорий с резко континентальным климатом. Он характеризуется низкими ветропотенциалом (скорость ветра 3–5 м/с) и инсоляцией (200–400 Вт/м²). В то же время сами территории являются неопределённым ресурсом для комплексного использования более широкого спектра нетрадиционных и возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [2].

Для повышения эффективности и надежности энергообеспечения удаленных объектов могут применяться системы с расширенным набором разных видов источников – кластеры ВИЭ. Внедрение кластерных систем с широким спектром ВИЭ осложняется для разработчиков и проектантов необходимостью знания ими технических и функциональных особенностей каждого из нетрадиционных и возобновляемых источников: наряду с ДГ(дизель-генераторами) и ГГ (газогенераторами) – ВЭУ(ветроэлектрических установок), ФЭП (фотоэлектрических преобразователей), СК (солнечных коллекторов), мГЭС (микро- и мини-гидроэлектростанций), ТН (тепловых насосов), БГУ (биогазовых установок), ВН (ветронасосов). Кроме того, возможность применения различных сочетаний ВИЭ ограничивается наличием или отсутствием соответствующих климато-географических факторов и, конечно, экономической целесообразностью.

Для внедрения кластерных систем энергоснабжения на базе использования возобновляемых источников энергии необходимо проведение научных исследований и разработок, учитывающих природно-климатические характеристики региона, его ресурсные возможности, а также соотношения мощностей устанавливаемого оборудования ВИЭ.

Все это в целом определяет актуальность разработки методики оптимизации состава энергетических систем на основе кластерного подхода, характеризующегося расширенным комплексным использованием ВИЭ.

В связи с принятием Закона №261 «Об энергосбережении, о повышении энергетической эффективности...» и энергетической стратегии России на период до 2030 г. [3] ещё более актуальной становится задача поиска новых рациональных решений в развитии региональной энергетики, что позволяет обеспечить ускорение реализации планов поэтапного внедрения ВИЭ в энергетический оборот, снижение выбросов ТЭК на органическом топливе в окружающую среду, а также повышение социальных эффектов (занятость населения, рост образовательного уровня).

В настоящее время научные исследования в области возобновляемой энергетики ведут более 30 научных организаций России, в том числе: ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Всероссийский институт электрификации сельского хозяйства (ВИЭСХ), НИИ «Квант», ЭНИН им. Кржижановского, НПО «Астрофизика», РИВТАН, МГУ им. М. В. Ломоносова, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, НПО «Машиностроение», Московский энергетический институт-ТУ, Санкт-Петербургский государственный технический университет, Московский государственный строительный университет, АО «Ленгидропроект», АО «Гидропроект», Карельский Научный Центр РАН, ЦАГИ им. Н. Е. Жуковского, МКБ «Радуга», ВНИИЭ, ЦНИИ «Электроприбор», Кольский Научный Центр РАН, ВНИИПИГеотерм, АО «Геотерм», АО «Наука», НИЦ «ЭкоРос», МВТУ им. Баумана, Сибирский Научный Центр РАН, МГУ инженерной экологии, ОКБ «Карат» и другие.

Одним из направлений исследований в Уральском федеральном университете имени первого Президента России Б. Н. Ельцина является разработка методологии нового – кластерного подхода к методике выбора параметров энергоустановок с широким спектром использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии и предложение алгоритма определения оптимального как в техническом, так и в экономическом отношении кластера ВИЭ.

Основные задачи, рассматриваемые в данной работе, можно условно разделить по следующим трем категориям:

- анализ основных ВИЭ и их сочетаний для удаленного объекта с целью создания энергоэффективных систем, обеспечивающих минимум энергозатрат в течение года, и максимально эффективное использование энергии, производимой в автономных условиях;

- разработка общей методологии технико-экономического анализа возможных вариантов электроснабжения удаленного автономного жилища в климатических условиях средней полосы России с внедрением кластерного подхода к комплексному использованию ВИЭ;

- разработка кластерного подхода к выбору параметров комбинированных энергоснабжающих систем на основе применения дискретной стохастической математической модели, учитывающей использование энергии солнца, ветра, гидропотенциала, биоотходов животноводства, низкопотенциального тепла в тепловых насосах для энергоснабжения небольших по мощности автономных объектов, удаленных от централизованных систем энергообеспечения.

Методы исследования. В работе, исходя из постановки решаемых задач и с учетом особенностей исследуемого объекта, при получении основных результатов использовались как теоретические, так и экспериментальные методы исследований. Методическую базу исследований составили теоретические основы теплотехники, ветроэнергетики, фотовольтаики, биометангенерации, апробированные классические методы гидравлики, теория автоматического управления, теоретическая электротехника, численные методы математического моделирования, теория рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания и тепловых насосов. Математические

построения и рассмотрение функционирования кластеров ВИЭ базируются на теории портфельных инвестиций Шарпа, Марковица и Дж. Тобиана.

МОНО- И КОМПЛЕКСНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ВИЭ

Современная энергетика характеризуется усилением тенденций диверсификации источников на базе развития новых технологий, совершенствования систем безопасности, получения новых материалов и дистанционных средств управления.

Особое место среди всех видов занимает возобновляемая энергетика.

Среди возобновляемых источников энергии широко распространены ветроэнергетические, малые гидроэнергетические (в т. ч. микро-, мини- и малые ГЭС), солнечные установки: солнечные коллекторы (СК), солнечные фотоэлектрические преобразователи (ФЭП), биогазовые установки (БГУ), а в числе нетрадиционных источников энергии (тепла) – тепловые насосы с использованием в испарителе низкопотенциального тепла грунта, сбросных вод очистных сооружений, тепловых стоков промышленных отходов или просто окружающего воздуха до небольших отрицательных температур.

Все указанные источники энергии могут использоваться либо в моноэнергостанциях, использующих какой-либо один вид оборудования (только ВЭУ или, например, только ФЭП), либо в той или иной конфигурации в составе гибридных установок, состоящих, как правило, из дизель-генератора (для гарантированного обеспечения энергией) и вариативного набора нескольких нетрадиционных и возобновляемых источников энергии (НВИЭ) в разных сочетаниях.

Так, известны гибридные ветросолнечные, ветродизельные и дизель-ветросолнечные установки, использующие два или три ВИЭ (соответственно их можно обозначать как дуплекс и триокластеры ВИЭ). Таким образом, гипотетически возможно наращивание резервирования комплексов с учетом местных, региональных или территориальных возможностей до кватро- (четыре), пента- (пять), сикстет-систем (шесть видов оборудования) и т. д., в соответствующие кластеры ВИЭ.

Расширенное комплексное использование возобновляемой энергетики в России могло бы в принципе повысить надежность, бесперебойность и безопасность энергоснабжения удаленных территорий и потребителей. Внедрение кластерных систем энергоснабжения на основе ВИЭ может также способствовать ускоренному решению задач достижения установленных индикаторов по выработке энергии на базе возобновляемых источников, определённых распоряжением Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. №1715-р).

Теоретические предпосылки решения вопроса

Математическая теория кластерного подхода для оптимизации процессов и систем не нова. Кластерный анализ – растущая дисциплина, которая связана с разработкой систем поддержки принятия решений. Она подробно описана в ряде исследований, посвященных бизнесу, социологии и экономике [4–6].

В 1981 г. Нобелевский лауреат Дж. Тобин получил это высокое звание за комплекс работ в области оптимизации финансовых портфельных инструментов. Работы американского экономиста базировались на фундаменте, заложенном его учителями Г. Марковицем и Шарпом, также, но чуть позже, ставшими Нобелевскими лауреатами (1990 г.) [7].

В своих исследованиях экономисты-Нобелевские лауреаты исследовали формирование портфелей ценных бумаг с целью поиска оптимальных соотношений рисков (частных имитентов) и безрисковых (государственных) акций.

Какое отношение это имеет к возобновляемой энергетике?

Как известно, акции и ценные бумаги различных предприятий имеют на фондовых рынках различную доходность, которая может изменяться самым непредсказуемым образом и является стохастической величиной. Анализ закономерностей стохастических процессов и привел Г. Марковица, а впоследствии и У. Шарпа, к созданию теории оптимизации финансовых портфелей. Она базируется на учете большого количества статистических данных, полученных за значительный промежуток времени, о множестве финансовых портфельных вложений. Цель, которую ставили американские ученые, –

повышение доходности и снижение финансовых рисков. Судя по результату, они её математически обосновали и доказали на практике. Среди многочисленных причин, в том числе благодаря теории оптимального финансового портфеля Марковица-Шарпа-Дж. Тобина, американская экономика и финансовая система до настоящего времени удерживает лидирующие позиции в мире.

На рис. 1 представлен график математической модели оптимального финансового портфеля по Дж. Тобину.

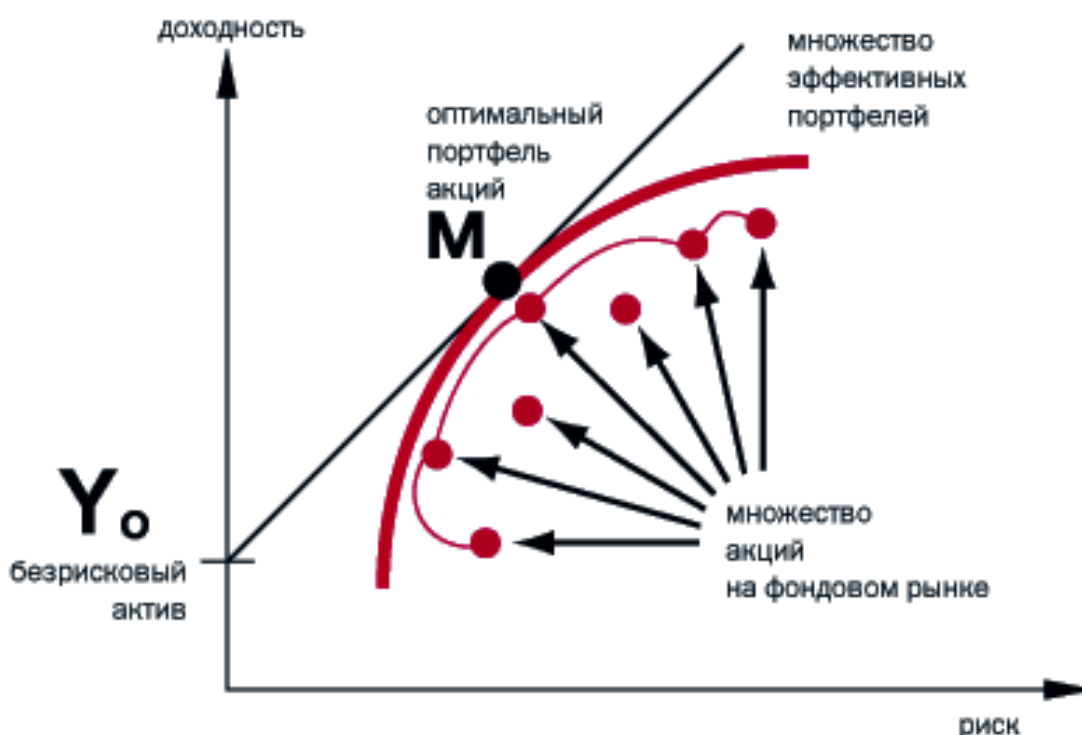


Рис.1. График доходности, риска и оптимального финансового портфеля акций по теории Дж. Тобина

На графике под безрисковыми активами (ось ординат) подразумеваются малодоходные, но надежные государственные финансовые бумаги и обязательства, практически не имеющие риска.

Оптимальный портфель, имеющий наивысшую доходность при минимальном риске, отыскивается в точке M — на касательной, проведённой от стоимости государственных ценных бумаг к гиперболе множества эффективных акций.

Аналогия финансового портфеля и ВИЭ

Возобновляемая энергетика обладает многими характерными признаками, схожими с финансовыми инструментами: солнечная инсоляция, скорость ветра, скорость течения реки (в меньшей степени) – стохастические характеристики. Значительные риски при использовании возобновляемой энергетики являются основной проблемой для крупных энергогенерирующих компаний и частных потребителей при решении вопроса внедрения и распространения ВИЭ.

Приведённые в финансовой модели факторы (наличие набора разных акций, стохастичность дохода, риск) привели к мысли о возможности использования теории оптимального финансового портфеля в разработке методологии оптимального комплекса ВИЭ в составе нескольких разнотипных систем (ветро-, гидро-, солнечные ФЭП, солнечные коллекторы, биогазовые и геотермальные установки, а также тепловые насосы).

Такие системы, основной особенностью которых является одновременно использование сразу нескольких видов возобновляемых источников энергии, – и есть кластеры ВИЭ.

Необходимость использования именно кластеров ВИЭ, а не монокомплексов, обуславливается для России следующими факторами:

- относительная низкая средняя инсоляция на большой территории страны, обусловленная географическим расположением ($250\text{--}500 \text{ Вт/м}^2$);

- низкопотенциальный ветер со средней скоростью 3–5 м/с на 80–85 % территории страны, обусловленный резко континентальным климатом и удаленностью от морей и океанов;

- значительные расстояния от мощного производителя до удаленных децентрализованных потребителей электроэнергии (сотни км);

- низкая плотность населения и экономическая нецелесообразность устройства или восстановления протяженных линий электропередач.

Указанные факторы обусловили широкое распространение в 50–60 гг. XX в. и до настоящего времени дизель-генераторов как надежного, безрискового источника энергии. Основной проблемой их использования является постоянная и дорогостоящая топливная составляющая, которая при использовании ВИЭ равна нулю.

В качестве измерителя риска в выработке энергии на оборудовании ВИЭ может использоваться дисперсия себестоимости выработки 1 кВт·ч электроэнергии. Диверсификация оборудования при правильном ее применении приводит к уменьшению этой дисперсии при всех прочих равных условиях. Диверсификация базируется на простой гипотезе. Если каждая компонента комплекса (в рассматриваемой задаче – оборудование ВИЭ) характеризуется некоторой дисперсией себестоимости выработки 1 кВт·ч электроэнергии, то себестоимость выработки 1 кВт·ч в кластере ВИЭ имеет дисперсию, определяемую его составом. Таким образом, изменяя состав оборудования кластера ВИЭ, можно менять суммарную дисперсию надежности, а в некоторых случаях свести ее к минимуму.

Для России, располагающей огромными территориями, сверх-удаленными друг от друга (по меркам стран Европы, Азии, Ю. Америки, Африки), централизованным производителем и потребителями энергии, а также высокими значениями ГСОП (градусо-суток отопительного периода), применение кластерных систем с использованием ВИЭ может стать наиболее эффективным решением энергообеспечения удаленных потребителей с использованием возобновляемых источников энергии.

Известно, что многие инновационные решения в технике базируются на стыке наук и научных исследований. Представленный материал, безусловно, в первую очередь относится к энергетике, к относительно новому и перспективному ее направлению – возобновляемым источникам энергии.

Разумеется, без математики ни энергетика, ни даже технические отрасли, их развитие, не мыслимы.

В данной монографии автор предлагает свой взгляд на проблему развития ВИЭ в стране, базирующийся на изучении теоретических основ оптимизации многофакторных стохастических процессов в

экономике и финансах, предложенных Нобелевскими лауреатами, американскими учеными Г. Марковицем, У. Шарпом и Дж. Тобином.

Российский лауреат Нобелевской премии Жорес Иванович Алфёров, будучи в 2003 г. в Уральском федеральном университете, подчеркнул, что будущее энергетики мира заключено в энергосбережении и достижениях в области солнечной и других возобновляемых источниках.

Свой скромный вклад в развитие российской возобновляемой энергетики призвана внести и данная монография.

Глава 1. ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА В МИРЕ И В РОССИИ

Прежде чем подойти к рассмотрению классификации и теории кластеров ВИЭ, представим общую картину состояния и динамики развития ВИЭ.

Энергетические потребности стран мира ежегодно возрастают. Развитие энергоснабжения и обеспечение потребностей в энергоресурсах достигается в настоящее время в основном за счет угля, нефти, газа и атомной энергетики. Относительно скорое исчерпание органических ресурсов (кроме угля) уже не вызывает принципиальных споров специалистов. Атомная энергетика после событий на АЭС «Фукусима-1» в Японии снова поставила под сомнение темпы своего развития в мире. В то же время солнечная, ветровая и другие возобновляемые источники энергии имеют ежегодный прирост установленных мощностей от 10 до 40 %.

Цель данной главы – анализ состояния и динамики традиционных и возобновляемых источников энергии в мире и в России, отличия и особенности внедрения ВИЭ в нашей стране и вытекающие из них задачи внедрения комплексных систем – кластеров ВИЭ в России.

Вновь отметим, что альтернативой традиционной энергетике на органическом топливе является целый спектр нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. К ним относятся ветро-, солнечная, гидроэнергетика, использование биомасс, низкопотенциального и сбросного тепла в тепловых насосах, приливные, волновые электростанции, использование температурного градиента, изотопных источников и т. п.

Энергетическая стратегия России на период до 2030 года определила следующие темпы ввода мощностей на НВИЭ: (утверждена распоряжением Правительства РФ от 13 ноября 2009 г., №1715-р) (см. табл. 1.1).

Таблица 1.1

Этапы внедрения ВИЭ и производства электроэнергии в России

Этапы реализации	2009 (факт.)	I 2013–2015	II 2020–2022	III 2030
Производство электрической энергии, млрд кВт·ч	1137	1059–1245	1350–1550	1800–2210
В том числе на базе ВИЭ, без крупных ГЭС, млрд кВт·ч	0,8 % 7,8	2,5 % 26–30	4,5 % 60–70	7 % 126–155

Указанная динамика НВИЭ далека от показателей мировых держав-лидеров и в перспективе не может устраивать Россию.

В то же время более быстрыми темпами внедрение ВИЭ в нашей стране в настоящее время объективно не может развиваться из-за отсутствия конкурентных преимуществ и всё ещё относительно низких цен на углеводородные виды энергоисточников.

28 мая 2013 г. Правительство России приняло Постановление №449 «О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности».

Казалось бы, «лед (по внедрению ВИЭ) тронулся».

Однако, с одной стороны, Постановление касается только трех ВИЭ: гидро-, ветро- и солнечных электрогенерирующих установок (не затронуты биоэнергетика, геотермальная энергетика). С другой, поддержку на уровне страны по этому Постановлению получают только владельцы установок мощностью 5 и более мегаватт. Таким образом, из системы стимулирования полностью исключается мелкий потребитель – частник, желающий приобрести и использовать ВИЭ.

В этой связи для поддержания многочисленных частных хозяйств, потребителей на удаленных децентрализованных территориях ещё актуальнее становится задача дальнейшего совершенствования малых систем ВИЭ мощностью от единиц киловатт до 5 МВт и их оптимизация с задачей комплексного использования имеющегося на конкретной территории энергетического потенциала в условиях России.

Рассматриваемый в данном исследовании кластерный подход в использовании ВИЭ как раз предполагает вовлечение многочисленных малых потребителей, находящихся, как правило, на удаленных территориях, децентрализованных по энергоснабжению.

1.1. Современное состояние и перспективы развития возобновляемой энергетики в России

Низкие темпы развития возобновляемой энергетики в России сегодня имеют свои объективные причины. Наличие крупнейших на планете запасов газа, самые высокие показатели по добыче нефти в мире, второе место по запасам угля – все это создает условия для комфортного энергетического обеспечения в стране сегодня. Однако специалистам понятно, что за возобновляемой энергетикой, ввиду неизбежного истощения запасов органических топлив, – будущее [8].

В табл. 1.2 представлен потенциал ВИЭ в России.

Таблица 1.2

Потенциал возобновляемых источников энергии в России

Вид НВИЭ	Потенциал России
Ветроэнергетика	8,6 ГВт
Солнечная энергетика	1,1 ГВт
Мини-ГЭС	2,1 ГВт
Приливная энергетика	Более 100 ГВт

Проект энергостратегии России до 2020 г. предусматривает следующую динамику в развитии возобновляемых источников энергии (табл. 1.3).

Таблица 1.3

Перспективы динамики развития ВИЭ в России

Вид возобновляемых источников энергии	Уст. мощность, МВт		Рост за 10 лет, %
	2010 г.	2020 г.	
Малые ГЭС	740	4700	640
Ветроэнергетика	16	6800	425
Солнечная энергетика	0,03	140	4660
Использование биомасс (пеллеты, мусор, метангенерация)	1450	7800	537
Геотермальная энергетика	71	750	1056
Приливная энергетика	1,5	4500	3000

Указанные индикаторы отражены в Постановлении Правительства РФ № 1-р от 08.01.2009 г. «О доведении к 2020 г. доли ВИЭ в электрогенерации России до 4,5 % (без больших ГЭС)».

При подготовке Постановления использовался Проект с обоснованием рубежей ветровых ЭС, определявший долю ВЭС в выработке электроэнергии страны к 2020 г. $\approx 1\%$ (17,5 млрд кВт·ч при суммарной мощности ВЭС 7 ГВт).

Дифференциация целевых показателей по видам ВИЭ (заказ государства на развитие ВИЭ) представлена в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Целевые показатели для России по видам ВИЭ

Вид ВИЭ	Показатель/год	2008 г.	2010 г.	2015(п) г.	2020(п) г.
ВИЭ, всего	Производство	8,41	17,8	35,5	80,5
	Мощность	2 180	3 862	9 262	25 450
	Доля, %	0,9	1,5	2,5	4,5

Вид ВИЭ	Показатель/год	2008 г.	2010 г.	2015(п) г.	2020(п) г.
Энергия ветра	Производство	0,0097	0,21	2,6	17,5
	Мощность	12	120	1 500	7 000
Энергия солнца	Производство	0,00002	0,00003	0,2	1,1
	Мощность	0,02	0,02	150	750
Малые ГЭС	Производство	2,8	3,5	10	20
	Мощность	683	850	2 430	4 800
Энергия приливов	Производство	0	0	0,024	2,4
	Мощность	1,5	1,5	12	4 500
Геотермальная энергия	Производство	0,4	0,6	1	2,1
	Мощность	71	90	150	300
Биомасса и биогаз	Производство	5,2	13,5	22,0	36,9
	Мощность	1 413	2 800	5 000	7 850
Прочие ВИЭ	Производство	0	0	0,08	0,5
	Мощность	0	0	20	250

Представленная динамика роста ВИЭ демонстрирует хоть и незначительный (в сравнении с мировыми темпами), но устойчивый рост запланированных показателей по всем направлениям.

1.2. Монокомплексы ВИЭ в мире

В настоящее время подавляющее число систем ВИЭ мира представлены монокомплексами. К ним относятся ветроэнергетические фермы, солнечные электрические станции, малые ГЭС, геотермальные ТЭС и ЭС и т. д.

Самые крупные монокомплексы ВИЭ применяются в следующих странах: США, Китай, Германия (ветрофермы, солнечные фотоэлектрические станции), Франция (приливная электростанция «Ранс»), Япония, Ю. Корея (солнечные ФЭС), геотермальные (США, Италия, Исландия). Их характеристики широко представлены в литературе, учебно-методических материалах и электронных средствах информации [9]. Среди самых больших по установленной мощности моностанций – ВЭС в штате Калифорния (США) – установленной мощностью 1550 МВт; ветроморская ВЭС Horns Rev 2, расположенная в Северном море, в 30 км от западного побережья Ютланда (Дания) 210 МВт; по фотоэлектричеству – КНР, установленная мощность в конце 2010 г. – 900 МВт, к 2012 г. – 2 ГВт, целевой показатель КНР к 2015 году – 15 ГВт установленной мощности; из строящихся ФЭС – в США (штат Калифорния, округ Сан Луис Обиспо), мощность ≈ 550 МВт.

Мощность солнечных тепловых коллекторов, работающих по всему миру, составила 210,2 ГВт (при занимаемой площади в 250 миллионов квадратных метров) к концу 2012 года. Среди них 156,4 ГВт относятся к плоским с остеклением и вакуумированным коллекторам и 20,9 ГВт к плоским без остекления. Мощность воздушных коллекторов составила 1,4 ГВт.

Подавляющее большинство установок находится в Китае (104,5 ГВт), Европе (32,9 ГВт) и США и Канаде (15,6 ГВт), что вместе составляет 87,1 % от общей установленной мощности.

Остальную часть делят между собой Австралия и Новая Зеландия (5,4 ГВт), Южная Америка (4,9 ГВт), прочие азиатские страны, такие как Южная Корея, Тайвань, Тайланд, Индия (4,8 ГВт), Япония (4,5 ГВт), Израиль и Иордания (3,6 ГВт) и некоторые страны Африки (1,2 ГВт).

1.3. Опыт эксплуатации комплексных систем ВИЭ за рубежом

Во многих странах мира мощные системы ВИЭ базируются, как известно, на использовании моноветро-, моносолнечных фотоэлектрических или моносолнечных теплогенерирующих комплексов.

В то же время имеются многочисленные примеры одновременного применения двух и более видов ВИЭ.

В Канаде для обеспечения энергией отдаленных поселков применяются гибридные схемы – ветродизельные и ветроводородные. Водород используется для производства электроэнергии в двигателях внутреннего сгорания. Ветроводородная схема применяется в проекте Prince Edward Island Wind-Hydrogen Village и в городе Рамеа. Мощность генератора водорода составляет 250 кВт. Ежегодно он позволяет экономить 120 тыс. л топлива, тем самым предотвращает выбросы в атмосферу: CO_2 – 320 т, NO_x – 6,8 т, SO_2 – 0,6 т.

В институте TAFE Tasmania (Австралия) действует комплекс, состоящий из двух ветроустановок, электролизера и дизельной установки, которая приспособлена для работы с водородом.

Пример эффективного использования ВДЭК: на острове Фэр (Шотландия) для поселка с населением 70 человек была построена электростанция с двумя ДЭС, первой (мощность – 20 кВт) было достаточно для электроснабжения летом, а другой (50 кВт) – для электроснабжения зимой (табл. 1.5). Ветровые условия на острове весьма благоприятны. Средняя скорость ветра – 9,6 м/с. В июне 1982 года там была установлена ВЭС мощностью 50 кВт. С тех пор производство энергии возросло в 3,7 раза. Эксплуатация ВДУ на острове Фэр показала, что себестоимость электрической энергии, получаемой от ДЭС, составляла 8 центов/кВт·ч, а от ВЭС – 3,5 цента/кВт·ч. Для этой станции было разработано специальное устройство, которое показывало, когда счетчик энергии переключается на более высокий тариф.

Таблица 1.5

Производство энергии на комплексной ветродельной установке (ВДУ) (о.Фэр) за год работы

Производство энергии на острове Фэр за год работы	Выработка энергии	
	абс. кол-во, кВт·ч	отн. кол-во, %
Энергоустановка		
Комплексная ВДУ	185 024	100,00
ВЭС	168 895	91,28
ДЭС	16 147	8,72

1.4. Краткий анализ исследований комплексных систем ВИЭ в России

Мировой опыт освоения ресурсов возобновляемых источников энергии (ВИЭ) показывает, что использование только одного вида ВИЭ в системах энергоснабжения автономных потребителей не всегда позволяет обеспечить надежное и бесперебойное энергоснабжение из-за физических особенностей самих ВИЭ. Как правило, энергоснабжение автономных потребителей за счет ВИЭ стараются обеспечить путем комбинации разных видов ВИЭ в так называемые энергетические комплексы (ЭК). В их состав обычно входят энергоустановки на базе ВИЭ, дизельные (бензиновые) энергоустановки (ДЭУ), а также разного вида системы аккумуляции энергии.

Во Всероссийском институте электрификации сельского хозяйства (ВИЭСХ, г. Москва) ведутся работы по большинству направлений возобновляемой и нетрадиционной энергетики. Под руководством академика, д-ра техн. наук Стребкова Д. С. в ВИЭСХе созданы научные школы в большинстве основных направлений ВИЭ, которые в своих исследованиях и разработках учитывают особенности климато-географических характеристик России [10–11].

Неоценимый вклад в развитие возобновляемой энергетики Российской Федерации внес и продолжает вносить руководитель секции ВИЭ РАО ЕЭС д-р техн. наук Безруких П. П. [12]. Он более 10 лет объединяет усилия всего научного сообщества, занимающегося вопросами исследований и внедрения ВИЭ в РФ. Благодаря его усилиям в России, в условиях могущественных газо- и нефтяных монополий, наличия значительных запасов органических ресурсов, удалось на государственном уровне последовательно отстаивать и продвигать вопросы развития ВИЭ.

Существенный вклад в становление возобновляемой энергетики внес и продолжает вносить Санкт-Петербургский политехнический университет (зав. каф., д-р техн. наук Васильев Ю. С., а в н. в. – д-р техн. наук, проф. Елистратов В. В.). Учеными университета проведены исследования потенциала возобновляемых источников энергии во всех регионах России, созданы атласы и справочники по

потенциалам федеральных округов и областей Российской Федерации [13–14], что позволяет рассчитывать комплексный потенциал энергии при использовании различных сочетаний ВИЭ.

Выполненные в МЭИ-ТУ д-ром техн. наук, проф. Виссарионовым В. И., Малининым Н. К. и Дорошиным А. Н. расчеты [15–16] показывают, что уже сегодня возможно создание ЭК на основе комплекса ветровой, теплонасосной, дизельной установок и системы аккумуляции водорода. При этом имеется возможность отказаться от использования ДЭУ. Однако для окончательного решения данного вопроса требуется эксплуатационный опыт. В целом же расчеты и исследования показывают высокую энергетическую эффективность комплекса, а при решении проблем доставки топлива – и экономическую эффективность. Основным недостающим звеном в указанных расчетах являлось отсутствие реальной апробации комплексной установки ВИЭ с опытом эксплуатации и статистических данных по её функционированию.

В работах известного российского ученого д-ра техн. наук, профессора Бутузова В. А. [17–18] показано, что в РФ ВИЭ наиболее широко используются в Краснодарском крае, где

- ежегодно добывается до 10 млн. м³ геотермальной воды;
- эксплуатируется более 70 солнечных водонагревательных установок общей площадью более 6,5 тыс. м²;
- десятки ветроагрегатов и фотоэлектрических преобразователей.

В результате анализа 69 скважин геотермальных месторождений Краснодарского края и республики Адыгея по характеристикам: дебет, температура на устье, общая минерализация, установлены прогнозные и утверждённые запасы: суммарная расчётная тепловая мощность 238 МВт и годовой потенциал выработки тепловой энергии – 834 тыс. МВт·ч.

Основополагающие исследования эффективности применения солнечных коллекторов в России, выполненные под руководством Бутузова В. А., послужили толчком для анализа возможностей и внедрения различных систем СК в более рискованном (с т. з. инсоляции и уровня ГСОП) Уральском регионе, и даже непосредственно в мегаполисе – Екатеринбурге [19].

В трудах российского ученого, д-ра техн. наук Попеля О. С. [20–22] выполнены исследования следующих простейших вариантов конфигурации комплексных ВИЭ: в качестве первичных источников энергии выбраны фотоэлектрическая батарея, ветроустановка и их комбинация. В качестве системы аккумулирования и вторичных источников энергии используется электрохимическая батарея и комбинация с водородным накопителем. Для упрощения анализа рассмотрена возможность покрытия с помощью ВИЭ постоянной в течение года нагрузки мощностью 1 кВт.

Представленные Попелем О. С. в качестве примера результаты относились к комплексам ВИЭ, функционирующим в климатических условиях Западного Кавказа (метеостанция Берма-мыт) и Сибири (Магадан) со следующими исходными данными:

- фотопреобразователи КПД – 15 %, угол наклона к горизонту равен широте местности, ориентация – южная;
- ветроустановка: минимальная рабочая скорость ветра – 3 м/с, при скорости ветра более 9 м/с генерируемая мощность постоянна;
- электрохимический аккумулятор КПД – 95 %, саморазряд – 0,1 % в час.

Попелем О. С. был создан комплексный стенд для экспериментальных исследований основных компонентов автономных энергоустановок с возобновляемыми первичными источниками энергии и водородными накопителями и автономная солнечно-ветровая энергоустановка для теплоснабжения ряда помещений и электропитания слаботочных систем Большого оптического телескопа Специальной астрофизической обсерватории РАН в горах Западного Кавказа. Разработаны методы математического моделирования и анализа технико-экономических показателей автономных солнечно-ветровых энергоустановок с электрохимическими аккумуляторами энергии и водородными накопителями для различных потребителей, расположенных в различных климатических условиях. Обоснована принципиальная возможность создания полностью автономных солнечно-ветровых энергоустановок (без сочетания с генераторами на органическом топливе) и оценены их технико-экономические показатели. Разработана и создана первая в России автономная солнечно-ветровая

энергоустановка теплоснабжения и аварийного электроснабжения слаботочных потребителей Большого оптического телескопа Специальной астрофизической обсерватории РАН.

Среди выводов Попеля О. С., важных для данной работы, следующие:

- применение солнечных и ветровых установок в качестве первичных источников энергии позволяет создать полностью автономные энергоустановки, обеспечивающие в различных климатических условиях гарантированное круглогодичное покрытие электрических нагрузок, по крайней мере, небольших потребителей;

- наиболее эффективными представляются комбинированные установки, оптимально (в зависимости от климатических условий) сочетающие солнечные и ветровые установки;

- требуется развитие работ по экспериментальной отработке и дальнейшему совершенствованию математических моделей автономных энергоустановок на возобновляемых источниках энергии, являющихся необходимой основой для обоснования оптимальных их конфигураций с учетом существенно различных реальных климатических условий эксплуатации и характеристик потребителей [23].

Канд. техн. наук Сидельников А. И. предложил методику проектирования энергокомплекса на базе ВИЭ, состоящего из ветровой (ВЭС), солнечной (СЭС) и гидравлической (ГЭС) электростанций на основе имитационно-оптимизационной модели [24–25]. Методика реализована в виде программы имитационного моделирования, которая может быть использована в составе САПР энергокомплексов на базе возобновляемых источников энергии (САПР ВИЭ), в составе автоматизированной системы научных исследований в области возобновляемых источников энергии (АСНИ ВИЭ). Недостатком разработки явилось то, что практического воплощения на реальном объекте она не нашла, если не считать использования в качестве учебно-лабораторного комплекса в высшем учебном заведении. Однако методика послужила одной из отправных точек для последующего развития и в данной монографии.

В работе казахского ученого Ташимбетова М. А., выполненной с учеными Санкт-Петербургского политехнического университета, рассматривается комплексное использование ВИЭ в республике Казахстан [26].

На примере Жамбыльской области южного Казахстана проведено обоснование выбора комбинированного энергокомплекса на основе ВИЭ для целей электроснабжения сельского населенного пункта потребной мощностью 100 кВт [27]. Определена средняя выработка электроэнергии системы электроснабжения и показано обеспечение годового графика нагрузки потребителя. Решение задачи оптимизации установленных мощностей энергоустановок системы электроснабжения на основе ВИЭ показало, что при современных удельных капитальных затратах на такие энергоустановки комбинированное использование ВИЭ в рассматриваемом варианте является целесообразным. Недостатком работы явилось отсутствие опытной эксплуатации внедренного комплекса ВИЭ.

Важные для продвижения комплексных систем ВИЭ исследования провел д-р техн. наук Шерьязов С. К. [28]. Для эффективного энергообеспечения потребителей от ВИЭ необходимо было определить энергетические характеристики возобновляемых источников. В качестве энергетических характеристик солнечной радиации рассматривались интенсивность солнечного излучения и продолжительность солнечного сияния, а для ветрового потока – скорость ветра, обеспечивающая среднесуточную мощность ветрового потока. Энергетические характеристики ВИЭ определялись на основе данных наблюдений. При этом необходимо учитывать случайный характер поступающей возобновляемой энергии.

Ввиду случайности продолжительности солнечного сияния Шерьязов С. К. исследовал вероятность его появления. Им рассматривалась продолжительность солнечного сияния «внутри дня» в условиях Южного Урала. Результаты исследования показали, что наиболее вероятные часы солнечного сияния распределяются симметрично относительно полудня [29].

В ходе исследования Шерьязовым С. К. установлены осредненные значения интенсивности солнечного излучения h_s при распределении продолжительности солнечного сияния (S) симметрично относительно полудня. Интенсивность солнечного излучения предложено определить как

$$h_s = h_0 \cdot b_s \cdot \exp\left(-0,25 \frac{S}{S_0}\right), \quad (1.1)$$

где $h_0 = 1360 \text{ Вт/м}^2$ – солнечная постоянная;

b_s – коэффициент, зависящий от времени года, приведен в табл. 1.6;

S_0 – возможная продолжительность солнечного сияния (долгота дня), ч.

Таблица 1.6

Параметр уравнения интенсивности солнечной радиации

Параметр	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
b_s	0,3	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,55	0,5	0,45	0,4	0,3	0,2

Коэффициент b_s показывает долю солнечной постоянной, приходящую на горизонтальную поверхность в полдень. Произведение коэффициента b_s на солнечную постоянную позволяет определить интенсивность солнечной радиации в полдень. Коэффициент b_s имеет ярко выраженный годовой ход и в летний период имеет наибольшее значение.

По средней интенсивности солнечного излучения, приведенной для соответствующей продолжительности солнечного сияния, несложно определить солнечную радиацию за заданное время S :

$$H_s = h_s S. \quad (1.2)$$

Для объективной оценки поступающей солнечной энергии необходимо знать вероятность появления продолжительности солнечного сияния, которая характеризует ее обеспеченность $p(S)$. Вероятностная характеристика дневной продолжительности солнечного сияния определяется для каждого месяца по данным наблюдений метеорологической службы.

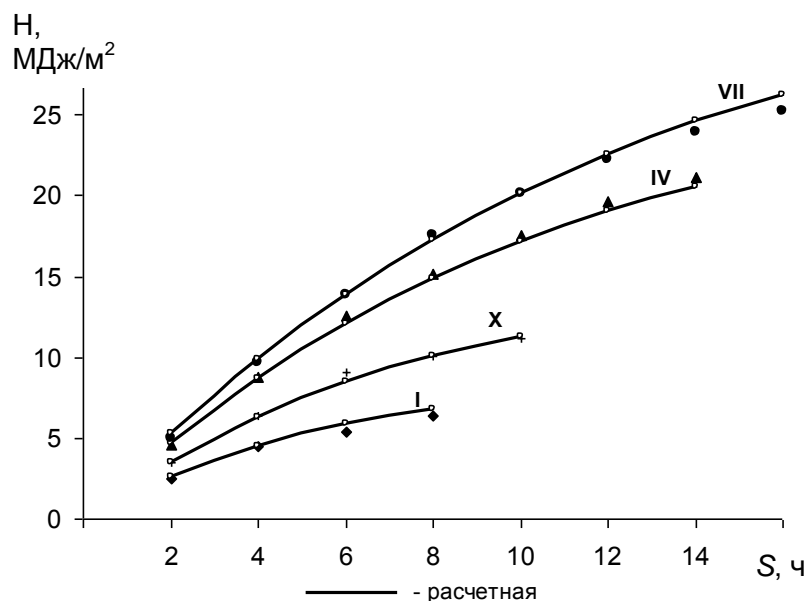


Рис. 1.1. Зависимость суммарной солнечной радиации от продолжительности солнечного сияния внутри дня

Известно, что удельная мощность ветрового потока представляется как осредненная величина за расчетный период и необходимо знать осредненную величину v^3 . Для этого требуются знать распределение повторяемости скорости ветра, которую можно определить для каждого месяца по данным наблюдений.

Тогда по эмпирической повторяемости ($t_{*(v)}$) или дифференциальной функции распределения $f(v)$ скорости ветра можно определить ожидаемую среднюю мощность ветрового потока за расчетный период

$$\overline{N}_0 = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} v^3 f(v) dv = \frac{1}{2} \rho (v^3)_{\text{ср}}, \text{ Вт/м}^2. \quad (1.3)$$

Среднее значение мощности ветрового потока автор рекомендует определить за сутки. Тогда скорость ветра, при которой ожидается среднесуточная мощность ветрового потока, представляется как энергетическая характеристика ветра.

Зависимость энергетической характеристики ветрового потока от средней скорости ветра (см. рис. 1.2) по Шерьязову С. К. хорошо аппроксимируется уравнением вида

$$v_{\text{ср.м}} = 1,4 + 1,1 v_{\text{ср}}, \quad (1.4)$$

где $v_{\text{ср}0}$ – средняя скорость ветра за месяц.

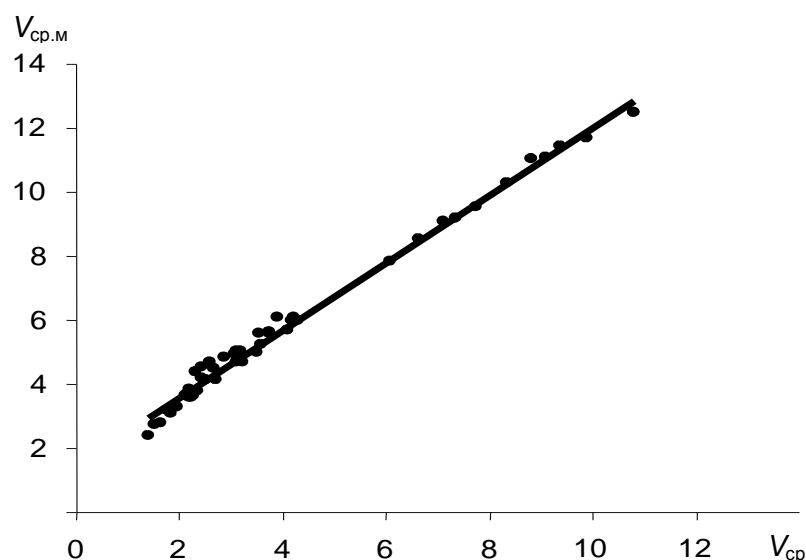


Рис. 1.2. Зависимость энергетической характеристики ветрового потока от средней скорости ветра

Недостатком исследований явилось отсутствие реализованной системы комплексного использования различных видов ВИЭ для полномасштабной апробации теоретических расчетов.

В целом комплексное использование ВИЭ до последнего времени ограничивалось ввиду объективных обстоятельств и неконкрентоспособности (дороговизны) оборудования для широко-масштабного применения. Однако рост тарифов на энергетические услуги и органическое топливо выводят вопрос повышения эффективности использования имеющихся возобновляемых ресурсов на новый уровень.

В связи с приведёнными примерами возникает задача продолжения исследований и поиска оптимальных решений по комплексному применению ВИЭ на основе кластерного подхода, предлагаемого в данном исследовании.

1.5. Проблемы энергообеспечения удаленных поселений в Свердловской области

Переход страны от одного способа производства (социалистического) к другому (рыночному) характеризовался упадком во многих отраслях промышленности и резким снижением внимания к поддержанию состояния оборудования, в частности электрических и тепловых сетей.

Энергетическое хозяйство Свердловской области вряд ли кардинально отличается по своему состоянию от других регионов России. Поэтому данные, приведённые в табл. 1.7 по управленческим округам Свердловской области, в целом характеризуют проблему ветхости протяженных сетей в стране.

Таблица 1.7

Состояние сетей в управленческих округах Свердловской области

Управленческие округа Свердловской области	Тепловые сети, км (только муниципальные)		Электрические сети, км (только муниципальные)	
	Всего	в т. ч. ветхие	Всего	в т. ч. ветхие
Восточный УО	675	310,8	1483	357
Западный УО	856	522,5	3960	1445,2
Северный УО	894	332,3	2240,2	192
Южный УО	1095	360,7	2641,1	930
Горнозаводской	1222,4	337,3	3914,7	1889,1
г. Екатеринбург	1404,6	611,9	1417,5	697,8
ВСЕГО по области	6147,8	2475,3	15657,4	5513,0

Таким образом, около 30 % всех сетей требуют в н. в. ремонта или замены, что влечёт необходимость весьма значительных финансовых вложений. В противном случае усугубляется риск возникновения аварийных ситуаций.

В июле 2012 г. была проведена ознакомительная поездка экспертов в удаленные малонаселённые поселки Ивдельского района Свердловской области (500 км на север от областного центра Екатеринбурга) с участием автора данной монографии.

Цель поездки – оценить готовность удаленных населенных пунктов к зимнему периоду и предложить мероприятия по энергообеспечению децентрализованных территорий и повышению его надежности.

Основной вывод экспертов: энергоснабжение удаленных поселков протяженными линиями электропередачи находится под постоянной угрозой и требует значительных затрат на поддержание и восстановление.

Перечень населённых пунктов и количество проживающих в одном из удаленных районов (Ивдельском) представлены в табл. 1.8. В данной таблице представлен расчет годового объема газа, потенциально необходимого для обеспечения каждого населённого пункта без указания затрат на прокладку газопроводов. Понятно, что для 5–10 жителей удаленного поселка тянуть нитку газопровода длиной 35–50 км экономически нецелесообразно. Поэтому единственным источником энергии там остаются дизель-генераторы, требующие постоянной доставки топлива. Руководство МРСК не считает возможным восстановление всех имеющихся в Ивдельском районе ЛЭП по причине отсутствия финансирования.

В этой связи актуальным становится вопрос об обеспечении удаленных населённых пунктов набором возобновляемых источников энергии. Для повышения эффективности и надежности энергообеспечения удаленных децентрализованных объектов, в качестве альтернативы, могли быть применены системы с расширенным набором разных видов ВИЭ, т. е. комплексные системы на базе возобновляемых источников энергии – кластеры ВИЭ.

В их числе классические установки, использующие ветровую, солнечную и гидроэнергию, биогазовые технологии с метангенерацией отходов животноводства и сельского хозяйства, а также нетрадиционные источники – тепловые насосы, преобразующие низкопотенциальное тепло грунта, воздуха, морей, а также сбросных вод и мусоросборочных полигонов.

Таблица 1.8

Населённые пункты с децентрализованным энергоснабжением

Населённый пункт	Численность проживающих, чел.	Кол-во инд. домов, ед.	Годовой расход газа (потенциально), тыс.м ³
Бурматово	50	17	66,48
Верхний Пелым	8	3	11,53

Окончание табл. 1.8

Населённый пункт	Численность проживающих, чел.	Кол-во инд. домов, ед.	Годовой расход газа (потенциально), тыс.м ³
Вижай	31	10	39,48
Глухарный	92	31	123,32
Денежкино	348	116	455,26
Екатерининка	400	133	563,28
Ивдель	17775	5925	55319,2
Лангур	133	44	172,92
Лозьвинский	180	60	235,48
Маслово	560	187	780,56
Митяево	5	2	7,61
Нагорный	7	2	8,09
Надымовка	132	44	105,69
Оус	1504	501	3117,9
Полуночное	2640	880	4103,3
Понил	25	8	31,63
Пристань	0	0	0
Северный	135	45	176,61
Старая Сама	590	197	2804,9
Суеватпауль	4	1	4,16
Талая	4	1	4,16
Улымсос	2	1	3,69
Хорпия	80	27	105,73
Шипичный	132	44	172,69
Юркино	0	0	0
Юрта Анямова	30	10	39,25
Юрта Бахтиярова	17	6	23,1
Юрта Курикова	6	2	7,85
Юрта Пакина	8	3	11,54
Юрта Хандыбина	2	1	3,69
Всего	24900	8301	68499,1

В целом по России показатели количества децентрализованных потребителей представлены в табл. 1.9.

Таблица 1.9

**Потенциальные децентрализованные потребители ВИЭ
в России**

Численность жителей в населенном пункте, чел.	Сельские жители (оценка 2011 г.)	Вахтовые поселки (оценка 2011 г.)	Жители малых городов Севера	Охотники, рыбаки, кочевники, геологи, строители ЛЭП и трубопроводов
До 50	$\frac{2640}{61,800}$	$\frac{2260}{60,800}$		$\frac{8000}{52,000}$
От 51–500	$\frac{10,187}{2,094,805}$	$\frac{490}{109,600}$		$\frac{160}{8,000}$
501–3000	$\frac{5,315}{5,368,160}$	$\frac{76}{55,800}$		–
3001–10 тыс.	$\frac{338}{1,882,839}$	$\frac{40}{119,600}$	$\frac{146}{373,000}$	–
Всего	9,407,604	345,800	373,000	60,000

Примечание. Знаменатель – число жителей.

1.6. Краткие выводы и постановка задач исследования

Возобновляемая энергетика в мире распространяется ускоренными темпами несмотря на экономические и финансовые кризисы и вносит все более существенный вклад в энергетический баланс развитых и развивающихся государств.

Развитие возобновляемой энергетики в России имеет устойчивую тенденцию к наращиванию, но темпы внедрения существенно отстают от мировых. Для России, характеризующейся на большей части своей территории резко континентальным климатом, требуется иной, по-сравнению с монокомплексами ВИЭ в мире, подход к внедрению и использованию возобновляемой энергетики, комплексно учитывающий следующее:

- пониженные средние значения инсоляции ($250\text{--}400\text{ Вт/м}^2$),
- в среднем низкопотенциальный ветер ($3\text{--}5\text{ м/с}$),
- огромные пространства страны (17 млн км^2),
- удаленность потребителей от традиционных централизованных источников энергии (сотни и тысячи км).

Таким подходом может стать использование кластерных систем энергоснабжения на основе ВИЭ.

В связи с указанными выводами были поставлены следующие задачи:

1. Разработать и создать в натурных условиях реальный объект для проведения комплексных исследований использования ВИЭ в различных сочетаниях видов и мощностей оборудования.

2. Предложить классификацию и новый – кластерный подход к использованию ВИЭ, базирующийся на широком применении различных видов ВИЭ и его математическом обосновании.

3. Провести экспериментальные исследования, математическое обоснование и натурные испытания кластеров ВИЭ на различных реальных объектах в условиях высоких значений ГСОП.

4. Разработать алгоритм и компьютерную программу для определения оптимального кластера ВИЭ по составу оборудования и его установленной мощности для районов с высоким значением ГСОП.

На рис. 1.3 представлена блок-схема комплекса исследований, выполненных на установках нетрадиционных и возобновляемых источников энергии в Уральском федеральном университете.

Исследования проводились в период с 1997 г., когда в Уральском государственном техническом университете-УПИ на кафедре «Атомная энергетика» была организована подготовка по специальности «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии».

С образованием в 2011 г. Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина было изменено и название кафедры, отражающее теперь два направления в её деятельности «Атомные станции и возобновляемые источники энергии».

Блок-схема на рис. 1.3 характеризует объем исследований и охват спектра работ, осуществляемых в области нетрадиционных и возобновляемых источников энергии автором совместно с коллегами.

Значимым показателем признания работ Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина по возобновляемой энергетике стала «Национальная экологическая премия», учреждённая Советом Федераций, Государственной Думой РФ и Фондом им. Вернадского В. И., за ВНЕДРЕННЫЙ ОБЪЕКТ «Энергоэффективный дом с комплексом возобновляемых источников энергии». Она была вручена непосредственным исполнителям (Щеклеин С. Е., Велькин В. И.) в декабре 2009 г. на торжественном заседании в зале Президиума Российской академии наук (г. Москва).

Существенную поддержку на протяжении реализации проекта «Энергоэффективный дом» оказывали правительство Свердловской области в лице Губернатора Росселя Э. Э., председателей правительства (в разное время) Воробьева А. В. и Кокшарова В. А. (ныне ректор УрФУ), заместителей председателя правительства Данилова Н. И. (ныне зав. каф. «Энергосбережение» УрФУ, и Штагера В. П. – одного из первых выпускников кафедры «Атомная энергетика» УПИ.

В блок-схеме (рис. 1.3) приведены основные объекты и результаты внедрения по всем направлениям исследований в области возобновляемой энергетике в УрФУ за период с 1997 по 2013 гг.

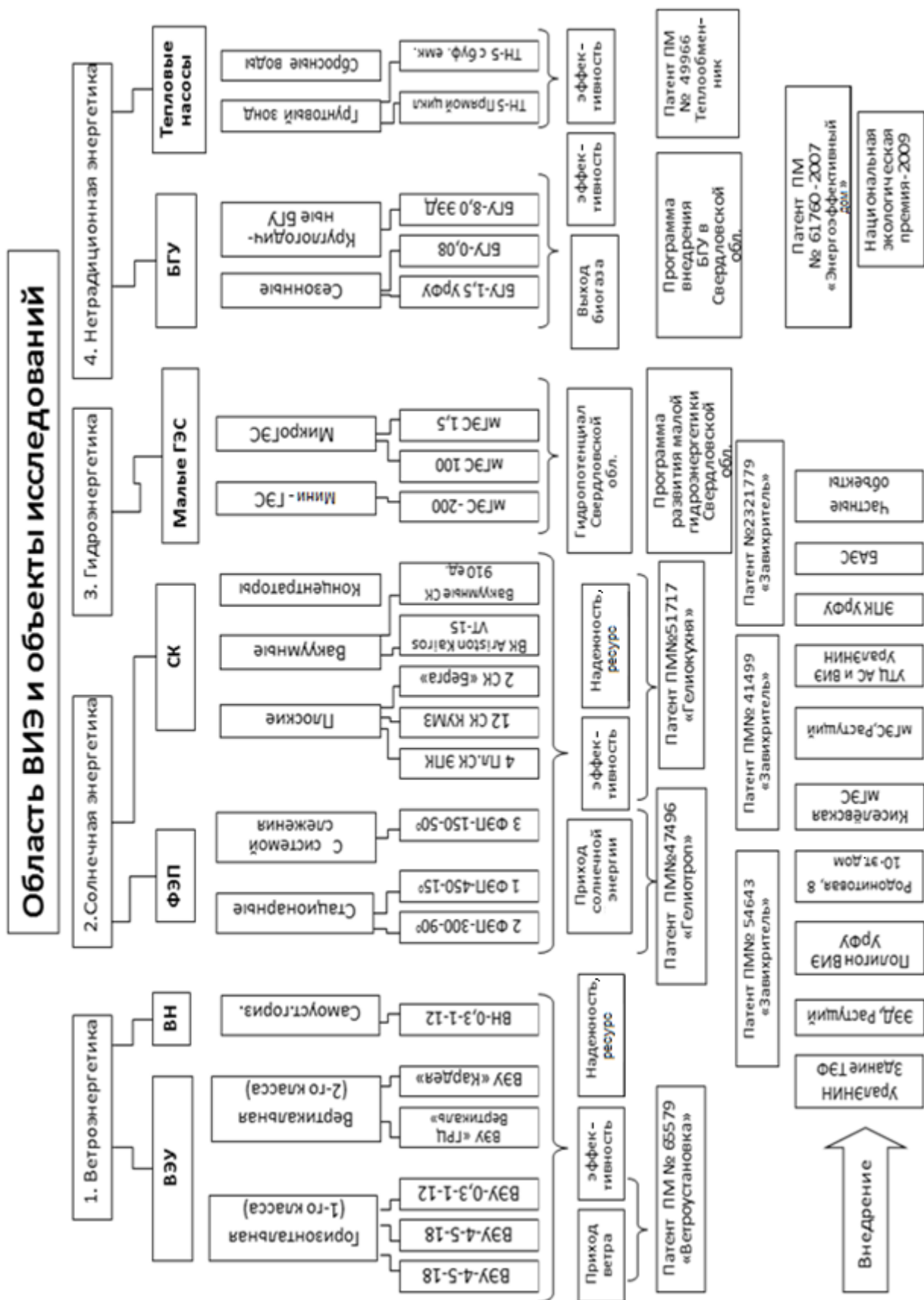


Рис. 1.3. Блок-схема комплекса исследований, выполненных в ходе работ

Глава 2. РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ОБЪЕКТА «ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ДОМ» ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ КЛАСТЕРНЫХ СИСТЕМ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВИЭ

Для решения задач по исследованию эффективности обеспечения здания электрической и тепловой энергией за счет возобновляемых источников энергии необходимо было подобрать или создать объект или несколько объектов, обладающих высокими теплозащитными характеристиками, и оснастить их различными ВИЭ [30]. В качестве одного из объектов для комплексных исследований была взята стандартная ферма КРС (72 х 18 м), находящаяся на балансе КСП «Косулинское» в 20 км от Екатеринбурга и более 18 лет простоявшая без какого-либо использования (см. рис. 2.1) [31].

Целью данного этапа работ на пути к исследованию кластеров ВИЭ была реализация проекта по реабилитации заброшенного объекта в «Энергоэффективный дом», оснащенный широким спектром нетрадиционных и возобновляемых источников энергии.

Решаемые задачи:

- разработка и осуществление мероприятий по реабилитации здания КРС и проектированию жилого дома повышенной комфортности с максимальным использованием имеющихся строительных конструкций;
- расчет ограждающих конструкций и теплозащитных характеристик дома для минимизации тепловых потерь;
- проектирование и оснащение объекта классическими, а также нетрадиционными и возобновляемыми источниками энергии;
- обеспечение тепловой защиты ограждающих конструкций здания на уровне, не ниже требуемого СНиП 23-02-2003 в течение всего срока эксплуатации здания, максимально повысив тем самым его энергоэффективность;
- исследование возможностей малозатратных технологий создания здания с низкими тепловыми потерями.



Рис. 2.1. Фото фермы КРС в пос. Растущий, Белоярского района.
Июнь 2001 г.

2.1. Организационно-правовые аспекты осуществления проекта «Энергоэффективный дом» в Уральском федеральном округе

Реабилитация заброшенной фермы КРС в Белоярской районе Свердловской области и создание на её базе экспериментального «Энергоэффективного дома» с комплексом возобновляемых источников энергии были инициированы учеными Уральского федерального университета (кафедра атомных станций и возобновляемых источников энергии), поддержаны руководством УрФУ, а также Правительством Свердловской области. Перед началом реконструкции объекта были получены экспертные заключения служб санитарно-эпидемиологического надзора, строительной экспертизы о возможности выполнения мероприятий по реабилитации фермы КРС в жилой дом.

Для осуществления мероприятий по созданию объекта исследований был организован ПЖСК «Энергоэффективный дом», научным руководителем которого стал Заслуженный энергетик РФ, д-р техн. наук, профессор С. Е. Щеклеин, а директором-техническим руководителем автор данной монографии.

2.2. Технические решения при реконструкции заброшенного объекта и его реабилитации в комфортное сельское жилье

В ходе выполнения проекта «Энергоэффективный дом с комплексом возобновляемых источников энергии» и реконструкции объекта решались две основные задачи:

1. Создание здания с высокими теплозащитными характеристиками для минимизации тепловых потерь в условиях высоких значений ГСОП (более 5500).

2. Оснащение объекта комплексом нетрадиционных и возобновляемых источников энергии для проведения исследований эффективности их функционирования в условиях Уральского региона.

Первоначально здание бывшего коровника было очищено и освобождено от бетонных кормолотков. Все остальные строительные конструкции объекта (фундаменты, стены, несущие колонны, перекрытия кровли, гидроизоляция) были сохранены и использованы, что существенно снизило суммарные затраты на объект.

Первый этаж здания КРС был разбит на 8 примерно равных частей (будущие квартиры) и разделён перегородками из облегченных газозолобетонных блоков.

Второй этаж был надстроен и так же разделен поквартирно.

Таким образом, запрещенная ферма КРС была реабилитирована в комфортабельный таун-хаус из восьми двухэтажных сблокированных квартир.

На рис. 2.2 представлена схема разбивки реконструируемого здания на будущие квартиры. На рис. 2.3 показаны этапы реконструкции оконных и дверных проемов первого этажа будущего «Энергоэффективного дома».

Существующие оконные проемы стандартной фермы КРС были дополнены вновь пробитыми для повышения инсоляции помещений в жилом доме.

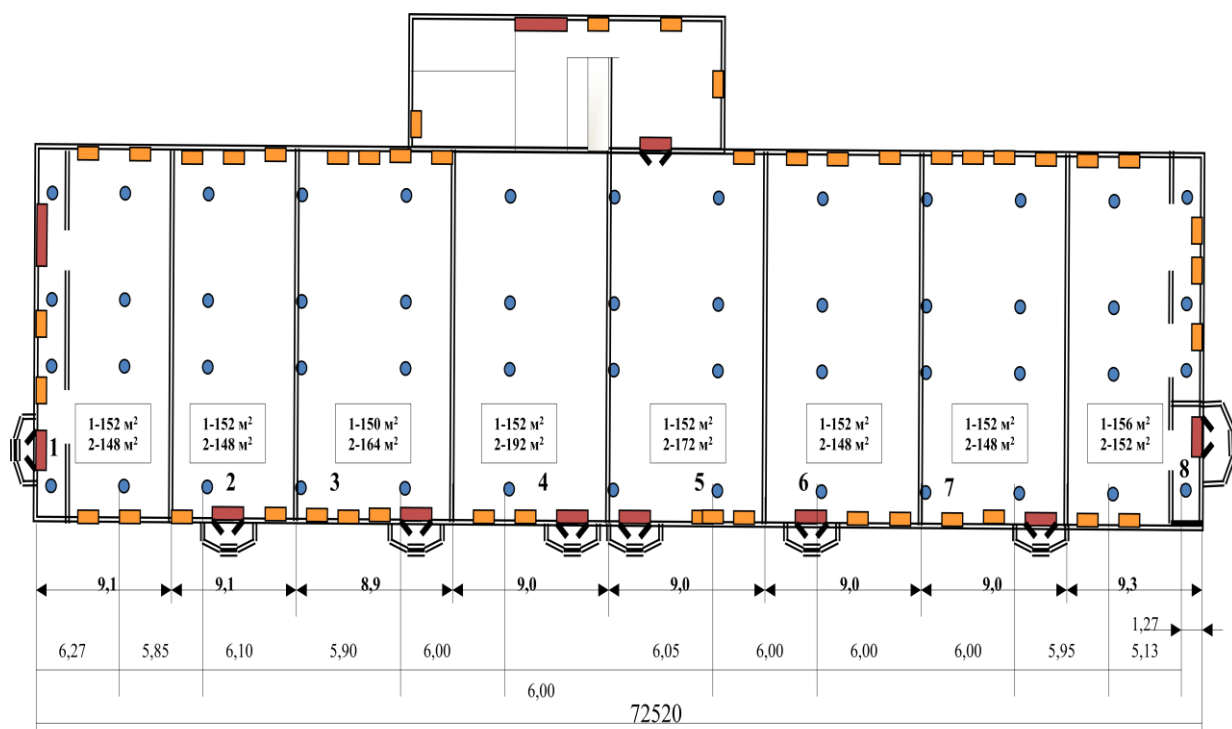


Рис. 2.2. Схема разбивки реконструируемого здания коровника на секции-квартиры «Энергоэффективного дома» (1-й этаж)

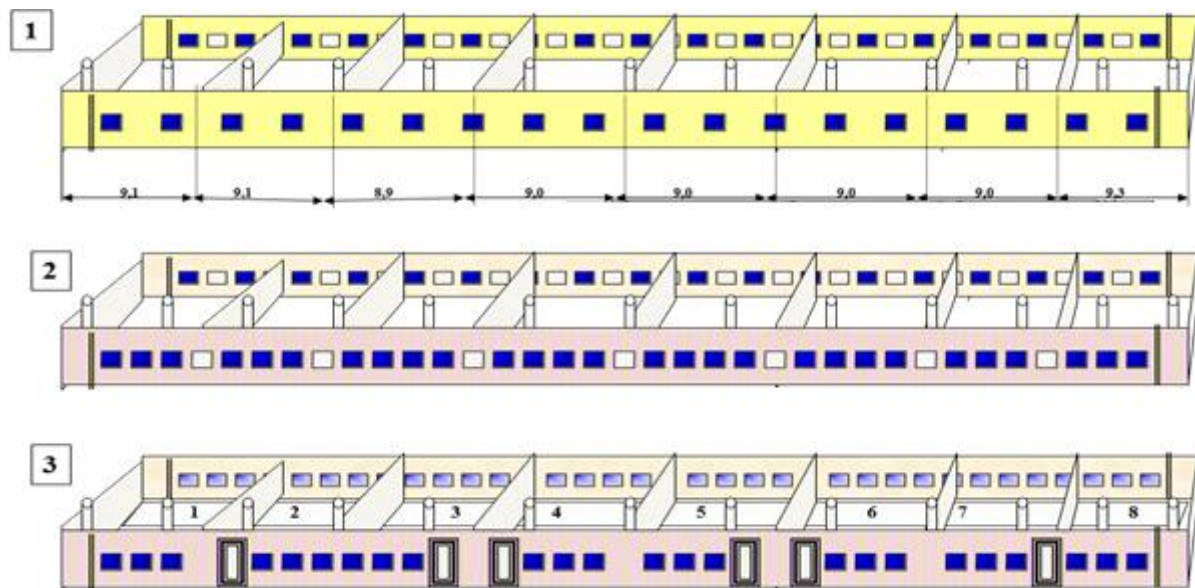


Рис. 2.3. Схема реконструкции оконных и дверных проемов в здании фермы, реабилитируемой в жилой дом (1-й этаж):

1 – схема существующих и законсервированных оконных проемов;

2 – схема реконсервации оконных проемов;

3 – схема расположения оконных и дверных проемов

Для организации второго этажа жилого здания в качестве несущих были использованы штатные колонны диаметром 577 мм, на которые были установлены двутавры. На рис. 2.4 представлена схема надстройки 2-го этажа здания.

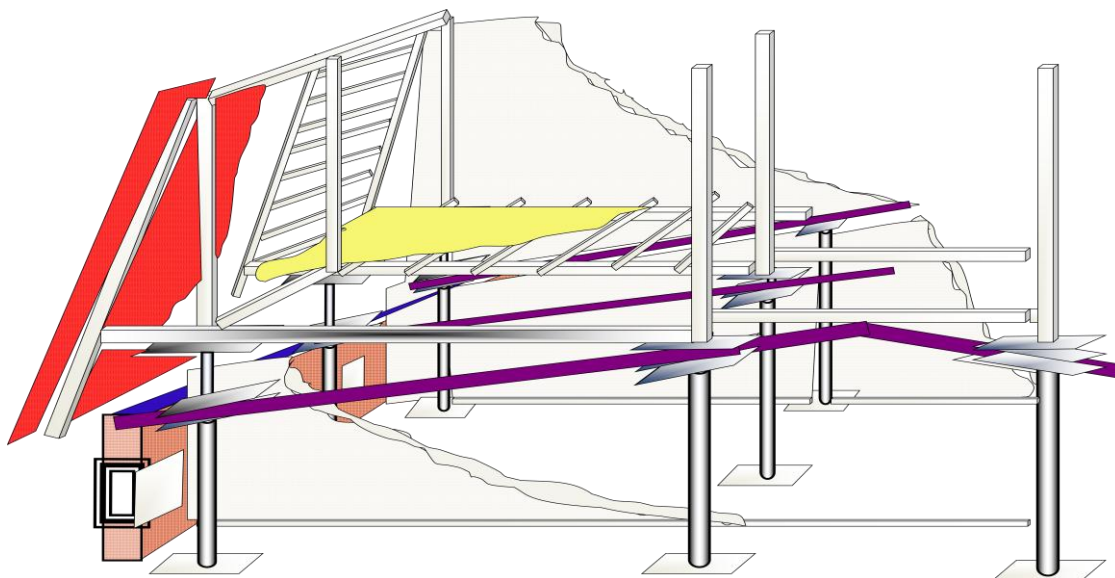


Рис. 2.4. Схема надстройки 2-го этажа при реконструкции здания фермы, реабилитируемой в «Энергоэффективный дом»

Схема сочленения штатной несущей колонны и надстраиваемого двутавра представлена на рис. 2.5.

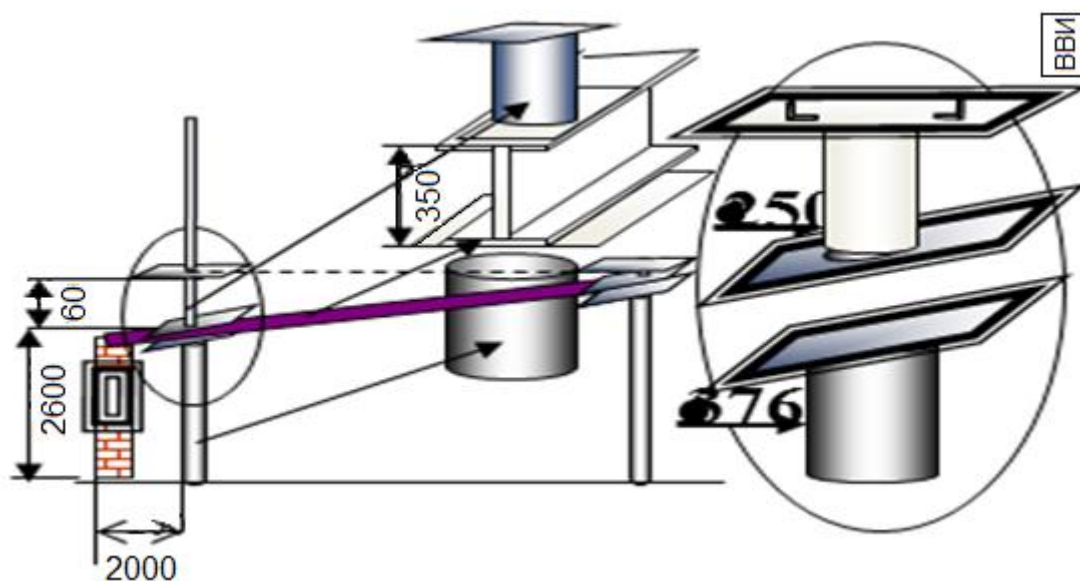


Рис. 2.5. Схема элементов для надстройки 2-го этажа при реконструкции фермы, реабилитируемой в жилой дом

Краткая характеристика объекта:

Загородный жилой дом, предназначенный для круглогодичного проживания 8 семей.

Площадь застройки (по первому этажу), м^2 – 1024.

Количество квартир – 8.

Этажность – 2.

Площадь каждой квартиры – ок. 300 м^2 , что в среднем превышало площадь одного удаленного дома, требующего энергетических затрат на электро- и теплоснабжение.

При проектировании рассматривались варианты такого же по общей площади дома с 12 и 16 квартирами, с соответствующей площадью каждой квартиры по 180 и 150 м^2 .

В Европе к настоящему времени сложилась классификация зданий по энергоэффективности [32–33]:

ДНЭ – дома низкого энергопотребления;

ДУЭ – дома ультранизкого энергопотребления;

пассивные – не нуждающиеся в отоплении.

Задачей при строительстве объекта для использования кластера ВИЭ было максимальное снижение потенциальных теплопотерь.

2.3. Расчет термических сопротивлений ограждающих конструкций «Энергоэффективного дома»

С целью эффективного использования энергетических ресурсов ВИЭ необходимо было выполнить расчет тепловой нагрузки по каждой квартире и по всему объекту в целом. Задача снижения тепловых потерь в доме была крайне актуальна в связи с высокой стоимостью вырабатываемой возобновляемыми источниками энергии и необходимостью рачительного её использования.

Для расчета тепловых характеристик здания требуется знание ряда параметров, которые характеризуют объект, в зависимости от его местоположения.

В табл. 2.1 представлены исходные данные для города Екатеринбурга:

Таблица 2.1

Исходные данные для города Екатеринбурга

Наименование показателя	Обозначение	Ед.изм.	Значение
Район строительства пос. Растущий, Белоярский район			
Средняя температура наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 (СНиП23-01-99)	t_n	°C	- 35
Средняя температура отопительного периода (СНиП23-01-99)	t_c	°C	- 6
Расчетная температура воздуха в помещении (табл. 4.2 ТСН 23-301-2004 Свердловской области)	t_b	°C	21
Продолжительность отопительного периода (табл. 4.3 ТСН 23-301-2004 Свердловской области)	Z	°C	230
Назначение здания (СНиП23-01-99)	Жилое		
Нормируемый температурный перепад между температурами внутреннего воздуха и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции (табл. 5 СНиПП-3-79*)			
- наружных стен	Δt_n	°C	4
- покрытий и чердачных перекрытий	Δt_n	°C	3
- перекрытий над подъездами и подвалами	Δt_n	°C	2

Требуемое приведенное термическое сопротивление определяется по табл. 4 в СНиП 23-02-2003, в зависимости от градусо-суток отопительного периода (ГСОП).

Уровень ГСОП определяется по формуле (2.1) в СНиП 23-02-2003:

$$\text{ГСОП} = (t_b - t_c) \cdot Z, \quad (2.1)$$

где t_b – температура воздуха в помещении, °С;

t_c – средняя температура отопительного периода, °С;

Z – продолжительность отопительного периода, сут.

ГСОП (для Екатеринбурга) = $(20 + 6) \cdot 230 = 5980$ °С·сут.

Данные расчётов требуемых термических сопротивлений занесены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Результаты расчета требуемых термических сопротивлений

Наименование конструкции	$R_{\text{тр}}, (\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})/\text{Вт}$
Стены	3,6
Покрытия	5,3
Окна и балконные двери	0,6

Для снижения теплотерь на объекте «Энергоэффективный дом» были проведены расчеты и реализованы различные инновационные решения, способствующие снижению тепловых потерь.

Сопротивление теплопередаче R_0 ограждающей конструкции выполнялось в соответствии с СП 23-101-2004 по формуле:

$$R_0 = R_B + (R_1 + R_2 + \dots + R_n) + R_H, \quad (2.2)$$

где $R_B = 1/\alpha_b$ – сопротивление теплопередаче внутренней поверхности ограждающей конструкции, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})/\text{Вт}$;

α_b – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности, приведён в табл. 2.3;

R_1, R_2, \dots, R_n – термическое сопротивление слоев ограждающей конструкции, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})/\text{Вт}$;

$R_H = 1/\alpha_H$ – сопротивление теплопередаче наружных поверхностей ограждающей конструкции, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$;

α_H – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности, приведён в табл. 2.3.

Термическое сопротивление R_n однородного слоя однослойной ограждающей конструкции определяется по формуле

$$R_n = \delta/\lambda, \quad (2.3)$$

где δ – толщина слоя, м;

λ – теплопроводность слоя, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций зависит от материала конструкций и от его толщины. Из табл. 2.3 можно увидеть, что большинство ограждающих конструкций состоит из нескольких материалов разной толщины.

Приведенное сопротивление теплопередаче светопрозрачных конструкций принимается на основании сертифицированных испытаний (табл. 2.1), (СП 23-101-2004): для окон принимаем $R_0 = 0,5 (\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$.

Согласно [34] приведенное сопротивление теплопередаче наружных ограждений R_0 должно приниматься не ниже требуемых значений $R_{\text{тр}}$, которые устанавливаются по табл. 2.2, (СНиП 23-02-2003) в зависимости от градусо-суток отопительного периода.

Однако при хорошей изоляционной способности материалов допускаются отклонения от норм.

Роль теплозащитных качеств любого объекта при высокой стоимости энергоресурсов и уровне энерготарифов многократно возрастает. Эффективность применения ВИЭ в этом случае также существенно повышается.

Таблица 2.3

Сопоставление характеристик разных ограждающих конструкций

Материал	Ограждение	δ , м	λ , Вт/(м ² ·°C)	R_n , (м ² ·°C)/Вт	R_B , (м ² ·°C)/Вт	R_H , (м ² ·°C)/Вт	R_0 , (м ² ·°C)/Вт	$1/R_0$, Вт/(м ² ·°C)
Бетон	Пол Этаж 1	0,08	1,92	0,042	8,7	23	2,6	0,39
Стяжка ц/п		0,015	0,76	0,11				
Пенополистирол		0,1	0,044	2,23				
Гидроизоляция (не учитываем)		0,01	0,17	0,059				
Ц/п раствор (не учитываем)		0,015	0,76	0,02				
Керамическая плитка (не учитываем)		0,01	0,7	0,0143				
Кирпич глин. обыкновенный	Наружная стена Этаж 1	0,51	0,7	0,73	8,7	23	5,4	0,2
Пенополистирол- бетон		0,2	0,044	4,5				
Ц/п раствор (не учитываем)		0,01	0,76	0,013				

Окончание табл. 2.3

Материал	Ограждение	δ , м	λ , Вт/(м ² ·°C)	$R_{нп}$, (м ² ·°C)/Вт	$R_{в}$, (м ² ·°C)/Вт	$R_{нл}$, (м ² ·°C)/Вт	R_0 , (м ² ·°C)/Вт	$1/R_0$, Вт/(м ² ·°C)
	Двойной стекло- пакет			0,5	8,0	23	0,7	1,4
	Дверь двойная						1,2	0,8
Плиты минераловатные ROCKWOOL ЛАЙТ БАТТС	Наружная стена Этаж 2	0,2	0,08	2,5	8,7	23	2,7	0,37
Гипсокартон (не учитывается)		0,01	0,34	0,03				
Плиты минераловат- ные ROCKWOOL ЛАЙТ БАТТС	Покрытие	0,15	0,08	2,5	8,7	23	2,7	0,4
Гипсокартон (не учитывается)		0,01	0,34	0,03				

2.3.1. Расчет теплопотерь через ограждающие конструкции объекта «Энергоэффективный дом»

Расчет тепловых потерь для объекта, использующего возобновляемые источники энергии, как указывалось и ранее, крайне актуален для учета и поиска решений по их минимизации и эффективного использования энергии, вырабатываемой ВИЭ.

Исходные данные для расчета тепловых потерь в доме.

Расчет производится по методике, изложенной в СНиП 2.04.05-91.

Результаты расчета на тепловые потери через каждую ограждающую конструкцию сведены в табл. 2.2.

Исходные данные для проектирования:

Климатический район по СНиП 23-01-99 – г. Екатеринбург

Данный расчёт выполнен со 100 % нагрузкой на среднюю температуру наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 (СНиП23-01-99*).

Температура наружного воздуха t_H : - 35 °С.

Средняя температура отопительного периода: - 6 °С.

Продолжительность отопительного периода: 230 сут.

Расчётная температура воздуха в помещении: 21 °С.

Трансмиссионные теплопотери и расход теплоты на нагрев вентиляционного воздуха определяются по СНиП 2.04.05-91 «Отопление, вентиляция и кондиционирование».

Основные и добавочные потери теплоты определяются путем суммирования потерь теплоты через отдельные ограждающие конструкции Q , Вт, с округлением до 10 Вт для помещений по формуле

$$Q_{\text{тр}} = A(t_p - t_{\text{ext}}) \cdot (1 + \Sigma\beta)n / R_0, \quad (2.4)$$

где A – расчетная площадь ограждающей конструкции (каждой из стен, пола, потолка, окон, дверей), м²;

t_p – расчетная температура воздуха в помещении, °С;

t_{ext} – расчетная температура наружного воздуха для холодного периода года при расчете потерь теплоты через наружные ограждения, т. е. средняя температура, °С периода со средней суточной температурой воздуха ниже или равной 8 °С;

β – добавочные потери теплоты в долях от основных потерь, определяемые по СНиП 2.04.05-91. Добавочные потери теплоты β через ограждающие конструкции принимаются в долях от основных потерь в помещениях любого назначения через наружные вертикальные и наклонные (вертикальная проекция) стены, двери и окна, обращенные на север, восток, северо-восток и северо-запад в размере 0,1, на юго-восток и запад – в размере 0,05; в угловых помещениях дополнительно – по 0,05 на каждую стену, дверь и окно, если одно из ограждений обращено на север, восток, северо-восток и северо-запад, и 0,1 – в других случаях;

n – коэффициент, принимаемый в зависимости от положения наружной поверхности ограждающих конструкций по отношению к наружному воздуху, приведен в табл. 2.3;

R_0 – сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, определяется по табл. 2.2, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$.

2.3.2. Расчет тепловых потерь ограждающих конструкций квартир

Для проведения дальнейших исследований эффективности использования ВИЭ, учитывая пространственное расположение квартир в доме, требовалось рассчитать тепловые потери ограждающих конструкций каждой из восьми квартир [36].

Кв. № 1, северная сторона; 1-й этаж.

Определим площадь ограждающих конструкций.

$$A_{\text{ст}} = A_{\text{с}} - A_{\text{ок}} - A_{\text{дв}}, \quad (2.5)$$

где $A_{\text{ст}}$ – расчетная площадь наружной стены без учета окон и дверей, м^2 ;

$A_{\text{с}}$ – расчетная площадь стены с учетом окон и дверей, м^2 ;

$A_{\text{ок}}$ – расчетная площадь окна, м^2 ;

$A_{\text{дв}}$ – расчетная площадь двери, м^2 .

$$A_{\text{с}} = 72 \text{ м}^2,$$

$$A_{\text{ок}} = 10,4 \text{ м}^2,$$

$$A_{\text{дв}} = 4,62 \text{ м}^2.$$

По формуле (2.5) получаем площадь стены без учета окон и дверей:

$$A_{\text{ст}} = A_{\text{с}} - A_{\text{ок}} - A_{\text{дв}} = 72 - 10,4 - 4,62 = 56,98 \text{ м}^2.$$

Тепловые потери северной стороны определяются согласно формуле (2.4):

$$Q_{\text{с}}^1 = A_{\text{с}}(t_p - t_{\text{ext}}) \cdot (1 + \Sigma\beta)n / R_0 = 56,98 \cdot (21 - (-35)) \cdot \frac{(1 + 0,1 + 0,05 + 0,05)}{5,4} = 710 \text{ Вт},$$

$$Q_{\text{ок}}^1 = A_{\text{ок}}(t_p - t_{\text{ext}}) \cdot (1 + \Sigma\beta)n / R_0 = 10,4 \cdot (21 - (-35)) \cdot \frac{(1 + 0,1 + 4 \cdot 0,05)}{0,7} = 1080 \text{ Вт},$$

$$Q_{\text{дв}}^1 = A_{\text{дв}}(t_p - t_{\text{ext}}) \cdot (1 + \Sigma\beta)n / R_0 = 4,62 \cdot (21 - (-35)) \cdot \frac{(1 + 0,1 + 2 \cdot 0,05)}{5,4} = 260 \text{ Вт},$$

где $Q_{\text{с}}^1$, $Q_{\text{ок}}^1$, $Q_{\text{дв}}^1$ – тепловые потери соответственно через стену, окна и двери, Вт.

Суммарные потери через северную сторону 1 этажа:

$$Q_{\Sigma, \text{сев}}^1 = Q_{\text{с}}^1 + Q_{\text{ок}}^1 + Q_{\text{дв}}^1 = 710 + 1080 + 260 = 2050 \text{ Вт}.$$

1-й этаж, западная сторона, кв. №1

Определим площадь ограждающих конструкций.

$$A_{\text{с}} = 36 \text{ м}^2,$$

$$A_{\text{ок}} = 3,64 \text{ м}^2,$$

где $A_{\text{с}}$ – расчетная площадь стены с учетом окон, м^2 ;

$A_{\text{ок}}$ – расчетная площадь окна, м^2 .

По формуле (2.5) получаем площадь стены без учета окон:

$$A_{\text{ст}} = A_{\text{с}} - A_{\text{ок}} = 36 - 3,64 = 32,36 \text{ м}^2.$$

Тепловые потери западной стороны определяются согласно формуле (2.4):

$$Q_{\text{с}}^1 = A_{\text{с}}(t_p - t_{\text{ext}}) \cdot (1 + \Sigma\beta)n / R_0 = 32,36 \cdot (21 - (-35)) \cdot \frac{(1 + 0,05 + 0,1)}{5,4} = 390 \text{ Вт},$$

$$Q_{\text{ок}}^1 = A_{\text{ок}}(t_p - t_{\text{ext}}) \cdot (1 + \Sigma\beta)n / R_0 = 3,64 \cdot (21 - (-35)) \cdot \frac{(1 + 0,05 + 2 \cdot 0,1)}{0,7} = 360 \text{ Вт},$$

где $Q_{\text{с}}^1$, $Q_{\text{ок}}^1$ – тепловые потери соответственно через стену и окна, Вт.

Суммарные потери через западную сторону 1 этажа:

$$Q_{\Sigma, \text{зап}}^1 = Q_{\text{с}}^1 + Q_{\text{ок}}^1 = 390 + 360 = 750 \text{ Вт}.$$

1-й этаж, восточная сторона, кв. №1.

Определим площадь ограждающих конструкций.

$$A_c = 36 \text{ м}^2,$$

$$A_{\text{ок}} = 7,28 \text{ м}^2,$$

где A_c – расчетная площадь стены с учетом окон, м^2 ;

$A_{\text{ок}}$ – расчетная площадь окна, м^2 .

По формуле (2.5) получаем площадь стены без учета окон:

$$A_{\text{ст}} = A_c - A_{\text{ок}} = 36 - 7,28 = 28,72 \text{ м}^2.$$

Тепловые потери восточной стороны определяются согласно формуле (2.4):

$$Q_c^1 = A_c(t_p - t_{\text{ext}}) \cdot (1 + \Sigma\beta)n / R_0 = 28,72 \cdot (21 - (-35)) \cdot \frac{(1 + 0,1 + 0,05)}{5,4} = 340 \text{ Вт},$$

$$Q_{\text{ок}}^1 = A_{\text{ок}}(t_p - t_{\text{ext}}) \cdot (1 + \Sigma\beta)n / R_0 = 7,28 \cdot (21 - (-35)) \cdot \frac{(1 + 0,1 + 4 \cdot 0,05)}{0,7} = 760 \text{ Вт},$$

где Q_c^1 , $Q_{\text{ок}}^1$ – тепловые потери соответственно через стену и окна, Вт.

Суммарные потери через восточную сторону 1 этажа:

$$Q_{\Sigma, \text{вост}}^1 = Q_c^1 + Q_{\text{ок}}^1 = 340 + 760 = 1100 \text{ Вт}.$$

Тепловые потери через ограждающие конструкции всего 1 этажа квартиры №1:

$$Q_{\text{кв. №1}}^1 = Q_{\Sigma \text{сев}}^1 + Q_{\Sigma \text{вост}}^1 + Q_{\Sigma \text{зап}}^1 = 2050 + 750 + 1100 = 3900 \text{ Вт}.$$

2-й этаж, северная сторона, кв. №1.

Определим площадь ограждающих конструкций.

$$A_c = 75 \text{ м}^2,$$

$$A_{\text{ок}} = 7,4 \text{ м}^2,$$

где $A_{\text{ст}}$ – расчетная площадь наружной стены без учета окон, м^2 ;

A_c – расчетная площадь стены с учетом окон, м^2 .

По формуле (2.5) получаем площадь стены без учета окон и дверей:

$$A_{\text{ст}} = A_c - A_{\text{ок}} = 75 - 7,4 = 67,6 \text{ м}^2.$$

Тепловые потери северной стороны определяются согласно формуле (2.4):

$$Q_c^2 = A_c(t_p - t_{\text{ext}}) \cdot (1 + \Sigma\beta)n / R_0 = 67,6 \cdot (21 - (-35)) \cdot \frac{(1 + 0,1 + 0,05 + 0,05)}{2,7} = 1680 \text{ Вт},$$

$$Q_{\text{ок}}^2 = A_{\text{ок}}(t_p - t_{\text{ext}}) \cdot (1 + \Sigma\beta)n / R_0 = 7,4 \cdot (21 - (-35)) \cdot \frac{(1 + 0,1 + 5 \cdot 0,05)}{0,7} = 800 \text{ Вт},$$

где Q_c^2 , $Q_{\text{ок}}^2$ – тепловые потери соответственно через стену и окна, Вт.

Суммарные потери через северную сторону 2 этажа:

$$Q_{\Sigma, \text{себ}}^2 = Q_c^2 + Q_{\text{ок}}^2 = 1680 + 800 = 2480 \text{ Вт}.$$

2-й этаж, западная сторона, кв. №1

Определим площадь ограждающих конструкций.

$$A_c = 36 \text{ м}^2,$$

$$A_{\text{ок}} = 9,8 \text{ м}^2,$$

где A_c – расчетная площадь стены с учетом окон, м^2 ;

$A_{\text{ок}}$ – расчетная площадь окна, м^2 .

По формуле (2.5) получаем площадь стены без учета окон:

$$A_{\text{ст}} = A_c - A_{\text{ок}} = 36 - 9,8 = 26,2 \text{ м}^2.$$

Тепловые потери западной стороны определяются согласно формуле (2.4):

$$Q_c^2 = A_c(t_p - t_{\text{ext}}) \cdot (1 + \Sigma\beta)n / R_0 = 26,2 \cdot (21 - (-35)) \cdot \frac{(1 + 0,05 + 0,05)}{2,7} = 600 \text{ Вт},$$

$$Q_{\text{ок}}^2 = A_{\text{ок}}(t_p - t_{\text{ext}}) \cdot (1 + \Sigma\beta)n / R_0 = 9,8 \cdot (21 - (-35)) \cdot \frac{(1 + 0,05 + 3 \cdot 0,05)}{0,7} = 940 \text{ Вт},$$

где Q_c^2 , $Q_{\text{ок}}^2$ – тепловые потери соответственно через стену и окна, Вт.

Суммарные потери через западную сторону 2 этажа:

$$Q_{\Sigma \text{зап}}^2 = Q_c^2 + Q_{\text{ок}}^2 = 600 + 940 = 1540 \text{ Вт}.$$

2-й этаж, восточная сторона, кв. №1.

Определим площадь ограждающих конструкций.

$$A_c = 36 \text{ м}^2,$$

$$A_{\text{ок}} = 9,8 \text{ м}^2,$$

где A_c – расчетная площадь стены с учетом окон, м^2 ;

$A_{\text{ок}}$ – расчетная площадь окна, м^2 .

По формуле (2.5) получаем площадь стены без учета окон:

$$A_{\text{ст}} = A_c - A_{\text{ок}} = 36 - 9,8 = 26,2 \text{ м}^2.$$

Тепловые потери восточной стороны определяются согласно формуле (2.4):

$$Q_c^2 = A_c(t_p - t_{\text{ext}}) \cdot (1 + \Sigma\beta)n / R_0 = 26,2 \cdot (21 - (-35)) \cdot \frac{(1 + 0,1 + 0,05)}{2,7} = 620 \text{ Вт},$$

$$Q_{\text{ок}}^2 = A_{\text{ок}}(t_p - t_{\text{ext}}) \cdot (1 + \Sigma\beta)n / R_0 = 9,8 \cdot (21 - (-35)) \cdot \frac{(1 + 0,1 + 3 \cdot 0,05)}{0,7} = 980 \text{ Вт},$$

где Q_c^2 , $Q_{\text{ок}}^2$ – тепловые потери соответственно через стену, окна, Вт.

Суммарные потери через восточную сторону 2 этажа:

$$Q_{\Sigma, \text{вост}}^2 = Q_{\text{с}}^2 + Q_{\text{ок}}^2 = 620 + 980 = 1600 \text{ Вт.}$$

Тепловые потери через ограждающие конструкции всего 2 этажа квартиры №1:

$$Q_{\text{кв. №1}}^2 = Q_{\Sigma \text{сев}}^2 + Q_{\Sigma \text{зап}}^2 + Q_{\Sigma \text{вост}}^2 = 2480 + 1540 + 1600 = 5620 \text{ Вт.}$$

Теплопотери через крышу, кв. №1.

Определим тепловые потери крыши в соответствии с формулой (2.4).

$$A_{\text{кр}} = 135 \text{ м}^2, \text{ где } A_{\text{кр}} - \text{площадь крыши помещения, м}^2,$$

$$Q_{\text{кр}} = A_{\text{кр}}(t_p - t_{\text{ext}}) \cdot (1 + \Sigma \beta)n / R_0 = 135 \cdot (21 - (-35)) \cdot \frac{(1 + 0,1 + 0,05)}{2,7} = 3220 \text{ Вт.}$$

Теплопотери через пол, кв. №1.

При расчете поверхность пола делят на три зоны шириной 2 м, параллельные линии наружной стены. К четвертой зоне относят всю остальную площадь.

Определение расчетных площадей полов, лежащих на грунте

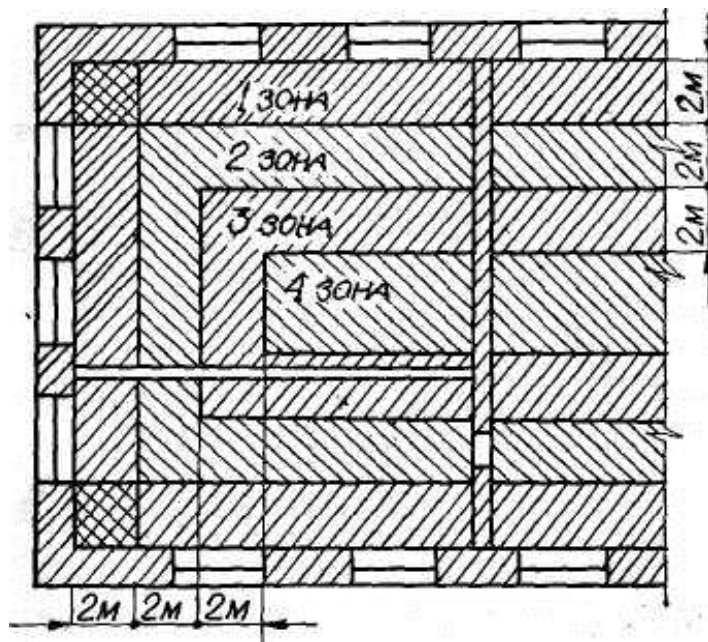


Рис. 2.6. Разбивка зон квартиры для расчета тепловых потерь через пол

$$A_{\text{пола}} = 17,3 \cdot 8,3 = 316,6 \text{ м}^2,$$

где $A_{\text{пола}}$ – площадь пола, м^2 ,

$$Q_{\text{пола}} = A_{\text{пола}}(t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) \cdot / R_{\text{з.п}}, \quad (2.6)$$

где $R_{\text{з.п}}$ – сопротивление теплопередаче соответствующей зоны пола, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$.

Значения $R_{3,п}$ для каждой из четырех зон приведены ниже:

Первая зона: $R_{3,п} = 2,15 \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C) / Вт}$.

Вторая зона: $R_{3,п} = 4,3 \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C) / Вт}$.

Третья зона: $R_{3,п} = 8,6 \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C) / Вт}$.

Четвертая зона: $R_{3,п} = 14,2 \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C) / Вт}$.

$$Q_{\text{пола}} = \left(\frac{143,59 \cdot ((21 - (-35)))}{2,15} \right) + \left(\frac{96,39 \cdot ((21 - (-35)))}{4,3} \right) + \left(\frac{57,19 \cdot ((21 - (-35)))}{8,6} \right) + \left(\frac{25,99 \cdot ((21 - (-35)))}{14,2} \right) = 5470 \text{ м}^2.$$

Таким образом, итоговые потери тепла в квартире №1 составляют:

$$Q_{\text{кв.№1}} = Q_{\text{кв.№1}}^1 + Q_{\text{кв.№1}}^2 + Q_{\text{кр}} + Q_{\text{пола}} = 3900 + 5620 + 3220 + 5470 = 18210 \text{ Вт}.$$

Итоговые потери тепла в квартире №2:

$$Q_{\text{кв.№2}} = Q_{\text{кв.№2}}^1 + Q_{\text{кв.№2}}^2 + Q_{\text{кр}} + Q_{\text{пола}} = 1850 + 2850 + 3220 + 5470 = 13460 \text{ Вт}.$$

Аналогично рассчитываются тепловые потери квартир №3 и 4, поскольку они имеют такую же планировку:

$$Q_{\text{кв.№3}} = 13460 \text{ Вт},$$

$$Q_{\text{кв.№4}} = 13460 \text{ Вт}.$$

Итоговые потери тепла в квартире №7:

$$Q_{\text{кв.№7}} = Q_{\text{кв.№2}}^1 + Q_{\text{кв.№2}}^2 + Q_{\text{кр}} + Q_{\text{пола}} = 1850 + 2850 + 3220 + 5470 = 13420 \text{ Вт}.$$

$$Q_{\text{кв.№5}} = 13420 \text{ Вт},$$

$$Q_{\text{кв.№6}} = 13420 \text{ Вт}.$$

Итоговые потери тепла в квартире №8:

$$Q_{\text{кв.№8}} = Q_{\text{кв.№8}}^1 + Q_{\text{кв.№8}}^2 + Q_{\text{кр}} + Q_{\text{пола}} = 3560 + 6500 + 3220 + 5470 = 18750 \text{ Вт}.$$

Таким образом, общие тепловые потери всего дома равны сумме тепловых потерь каждой квартиры:

$$\begin{aligned} Q_{\Sigma} &= Q_{\text{кв.№1}} + Q_{\text{кв.№2}} + Q_{\text{кв.№3}} + Q_{\text{кв.№4}} + m + Q_{\text{кв.№5}} + Q_{\text{кв.№6}} + Q_{\text{кв.№7}} + Q_{\text{кв.№8}} = \\ &= 18210 + 13460 + 13460 + 13460 + 13420 + 13420 + 13420 + 18750 = \\ &= 117600 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

Расход теплоты $Q_{\text{в}}$, Вт, на нагревание инфильтрующегося воздуха в помещениях жилых и общественных зданий при естественной вытяжной вентиляции, не компенсируемого подогретым приточным воздухом, следует принимать равным

$$Q_b = 0,28 \cdot L_n \cdot \rho \cdot c \cdot (t_p - t_c) \cdot k, \quad (2.7)$$

где L_n – расход удаляемого воздуха, м³/ч, не компенсируемый подогретым приточным воздухом; для жилых зданий – удельный нормативный расход 3 м³/ч на 1 м² жилых помещений;

ρ – плотность воздуха в помещении, кг/м³;

k – коэффициент учета влияния встречного теплового потока в конструкциях, равный 0,7 для стыков панелей стен и окон с тройными переплетами; 0,8 – для окон и балконных дверей с раздельными переплетами и 1,0 – для одинарных окон, окон со спаренными переплетами и открытых проемов.

$$L_n = 3 \cdot 9 \cdot 18 \cdot 2 = 972 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3;$$

$$c = 1 \text{ кДж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)};$$

$$k = 1.$$

По формуле (2.7) определяем расход теплоты на нагревание инфильтрующегося воздуха в помещении:

$$Q_b = 0,28 \cdot 972 / 3600 \cdot 1,225 \cdot 1 \cdot 1000 \cdot (21 - (-35)) \cdot 1 = 5190 \text{ Вт}.$$

Суммарное теплопотребление здания равняется сумме теплопотерь каждой квартиры и расхода теплоты на нагревание инфильтрующегося воздуха в помещении.

$$\text{Квартира №1: } 18210 + 5190 = 23400 \text{ Вт}.$$

$$\text{Квартира №2: } 13460 + 5190 = 18650 \text{ Вт}.$$

$$\text{Квартира №3: } 13460 + 5190 = 18650 \text{ Вт}.$$

$$\text{Квартира №4: } 13460 + 5190 = 18650 \text{ Вт}.$$

$$\text{Квартира №5: } 13420 + 5190 = 18610 \text{ Вт}.$$

$$\text{Квартира №6: } 13420 + 5190 = 18610 \text{ Вт}.$$

$$\text{Квартира №7: } 13420 + 5190 = 18610 \text{ Вт}.$$

$$\text{Квартира №8: } 18750 + 5190 = 23940 \text{ Вт}.$$

Итоговая расчетная установленная мощность при расчетной максимальной отрицательной температуре – 35 °С и средней -6 °С составляет 160 кВт для общей площади квартир 2400 м².

В силу показателя ГСОП на территории Свердловской области (около 6000) маловероятно появление в обозримом будущем домов с пассивным энергопотреблением [37]. По новым СНИП по теплотехнике удельный расход тепла составляет 73 Вт·ч /м²град.сут., что соответствует расходу жидкого топлива 35 л/год·м².

Проект УрФУ «Энергоэффективный дом», реализованный в Свердловской области, демонстрирует в этом ряду показатели для домов с низким энергопотреблением (ДНЭ) – до $150 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2 \text{ год}$, что соответствует удельному расходу тепла до $30 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2\text{град сут.}$, или расходу жидкого топлива 15 л/год м^2 .

2.4. Организация штатного энергоснабжения объекта «Энергоэффективный дом»

Основное электроснабжение объекта осуществлялось от Восточных электрических сетей (ВЭС) ОАО «Свердловэнерго» через трансформатор мощностью $100 \text{ кВ}\cdot\text{А}$. Предусматривается резервное электроснабжение через собственные установки возобновляемой энергетики.

Теплоснабжение реализовано через квартирные газовые котлы с подачей газа от сетей ОАО «Свердлоблгаз». Мощность котлов в каждой квартире – от 28 до 56 кВт.

Резервное теплоснабжение – электрические котлы, подключенные к системе электроснабжения. Мощность каждого котла 9–12 кВт.

Водоснабжение – скважина с системой подачи и накопления воды в баке – демпфере рабочей ёмкостью 300 л.

Канализация осуществлялась через выпуски от каждой двух квартир в систему биологической очистки бытовых стоков и далее – в дренажное поле, организованное в 50 м от объекта.

Для обеспечения многоквартирного дома энергией были выполнены все согласования, получены техусловия и проведены мероприятия по централизованному электро- и теплоснабжению объекта.

Энергообеспечение «Энергоэффективного дома» включает в себя две централизованные системы: линия электропередач 10/0,4 кВ и низконапорный газопровод D 88 с наземным (150 м) и подземным (180 м) участками, а также системой катодной защиты.

«Энергоэффективный дом» был сдан Государственной приемочной комиссии в декабре 2005 года (см. рис. 2.7).

Штатная система электроснабжения состоит из линии электропередач 10/0,4, трансформатора 100 кВ·А, распределительного шкафа (ШР), имеет трехфазную разводку по квартирам и шины технологического и резервного питания оборудования (см. рис. 2.8).



Рис. 2.7. Фото «Энергоэффективного дома»
с комплексом НВИЭ (2006 г.)

На каждую из восьми квартир предусматривалось по 10 кВт мощности [52].

Кроме того, потребителями электроэнергии являлись: скважный насос (3 кВт); освещение территории (4 кВт); дренажный насос очистной системы (1,5 кВт); катодная защита подземной части газопровода (3 кВт); эл. привод ворот (1 кВт); эл. обеспечение гаража (2,5 кВт); дежурное освещение тех.блока (0,5 кВт).

Штатное энергоснабжение в период эксплуатации продемонстрировало относительную надежность, характерную для удаленных районов. Как в любой сельской местности, энергоснабжение в течение года – минимум три-четыре раза – по разным объективным и субъективным причинам отключалось. В эти дни оборудование ВИЭ на объекте «Энергоэффективный дом» проходило реальные полномасштабные испытания и показало свою эффективность.

2.5. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии на объекте «Энергоэффективный дом»

Главной отличительной особенностью «Энергоэффективного дома» является наличие, наряду со штатной системой, комплекса возобновляемых источников энергии. В составе комплекса ВИЭ в «Энергоэффективном доме» были последовательно внедрены системы, представленные в табл. 2.4

Таким образом, общие системы жизнеобеспечения, помимо централизованного энергоснабжения, имеют резервирование, обусловленное наличием ВИЭ.

Таблица 2.4

Состав оборудования ВИЭ на объекте

Оборудование НВИЭ	Мощность	Кол-во	Год ввода в эксплуатацию
Ветроустановка ВЭУ 4-5	4 кВт	1	2002
Ветронасос ВН-300	300 л/сут	1	2002
Солнечные фотоэлектрические преобразователи (ФЭП)	2,4 кВт (пик)	80	2004
Солнечные коллекторы (СК)	24 кВт (т)	16	2005
Дизель-генератор	8 кВт	1	2005
Ветроустановка ВЭУ 4-5	4 кВт	1	2006
Биогазовая установка с 4-стадийной очисткой			2006
Ветроустановка ВЭУ-0,3	0,3 кВт	1	2007
Крышная станция солнечных ФЭП	0,45 (пик)	1	2007
Станция солнечных ФЭП	0,15 кВт	3	2008
Механический гелиотроп	0,15 кВт (пик)	1	2008
Усовершенствованные СК КУМЗ	3,0 кВт (т)	2	2009
Солнечный концентратор	2 кВт (т)	1	2009
Тепловой насос «Vaillant-5,5»	5,5 кВт (т)	1	2010
МикроГЭС с турбиной «Банки»	1,5 кВт	1	2011

Комплекс ВИЭ в период 2003 по 2013 годы позволил провести исследования, накопить практический опыт использования и оценить экономическую целесообразность применения различных типов кластеров нетрадиционных и возобновляемых источников энергии.

По установленной мощности комплекс ВИЭ «Энергоэффективного дома» обеспечивал до 15 % от максимума потребностей и гарантировал 100 % покрытие минимальных (аварийных) потребностей.

В их числе:

- дежурное освещение помещений в доме;
- декоративное освещение территории LED-светильниками;
- электропитание автоматики газовых котлов;
- энергообеспечение скважного насоса для подачи воды;
- электропитание средств коммуникаций (телевидение, радио, телефон, компьютеры);
- энергообеспечение энергомалозатратных бытовых адсорбционных холодильников;
- обеспечение ГВС в период с апреля по октябрь;
- отопление тех.блока (круглогодично);
- использование низкоэнергёмких электроинструментов;
- энергообеспечение кондиционера в дни повышенной инсоляции.



Рис. 2.9. Фото «Энергоэффективного дома». Февраль 2007 г.

Глава 3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОГО КЛАСТЕРА ВИЭ

Цель данной главы – представить методологию определения оптимального состава оборудования на основе анализа дискретной стохастической математической модели кластера ВИЭ.

Задачи:

- дать классификацию кластеров ВИЭ по видам оборудования;
- предложить классификацию кластеров ВИЭ по уровню использования (доля энергии от полного объема);
- ввести понятия безрискового и рискованных источников энергии модели кластера ВИЭ;
- разработать алгоритм расчета оптимального кластера ВИЭ для данной территории по критерию минимальной стоимости выработки 1 кВт·ч энергии;
- разработать компьютерную программу для расчета оптимального по составу оборудования кластера ВИЭ для конкретной территории по заданию заказчика.

Выше указывалось, что в настоящее время известны гибридные ветросолнечные, ветродизельные и дизель-ветросолнечные установки, использующие два или три ВИЭ (их можно обозначить соответственно дуплекс и триокластеры).

Как правило, все рассматриваемые гибридные системы специально не классифицировались авторами ни по составу используемого оборудования ВИЭ, ни по доле мощности, покрывающей полную потребность заказчика.

Кроме того, применение гибридных систем энергообеспечения на основе возобновляемых источников рассматривалось с использованием двух, трех, максимум – четырёх ВИЭ и на практике не предполагало возможного расширения их номенклатуры в зависимости от наличия или отсутствия объективных условий для внедрения в регионе и экономической целесообразности.

Таким образом, в настоящее время в мире отсутствует какая-либо классификация энергетических систем и установок, использующих ВИЭ, по их составу и гарантированной покрываемой

мощности. Это обстоятельство накладывает свой негативный отпечаток на внедрение и распространение ВИЭ в России вообще и кластерных систем на их основе, в частности:

- у потребителя оборудования нет представления о возможностях кластерных систем ВИЭ на данной территории;
- у потенциального производителя оборудования нет математического аппарата для оптимизации кластеров ВИЭ под заказчика;
- у частных пользователей нет понятия о разнообразии вариантов применения ВИЭ для конкретных условий;
- у дилеров отсутствует возможность оптимизации энергетической системы на базе ВИЭ и математический аппарат для оптимизации и привязки её по месту с учетом объективных условий и возможностей заказчика.

Теоретически возможно наращивание резервирования систем с учетом местных, региональных или территориальных возможностей до трио- (трех), кватро- (четырёх), пента- (пяти), сикстет- (шести), септ- (семи), окта- (восьюми) кластеров ВИЭ. Указанные сочетания-кластеры ВИЭ могут стать востребованы лишь в определённых условиях (наличие соответствующих источников энергии), их рентабельность зависит от точного выбора видов оборудования НВИЭ, соотношения замещаемых каждым источником энергии мощностей и, наконец, возможностей потребителя. На схеме (см. рис. 3.1) условно показан вариант использования окта-кластера, реализованный на объекте «Энергоэффективный дом». Представленный набор ВИЭ не адаптировался по соотношениям мощности оборудования, т. к. в то время отсутствовала методология использования оптимального кластера ВИЭ и алгоритм его расчета.

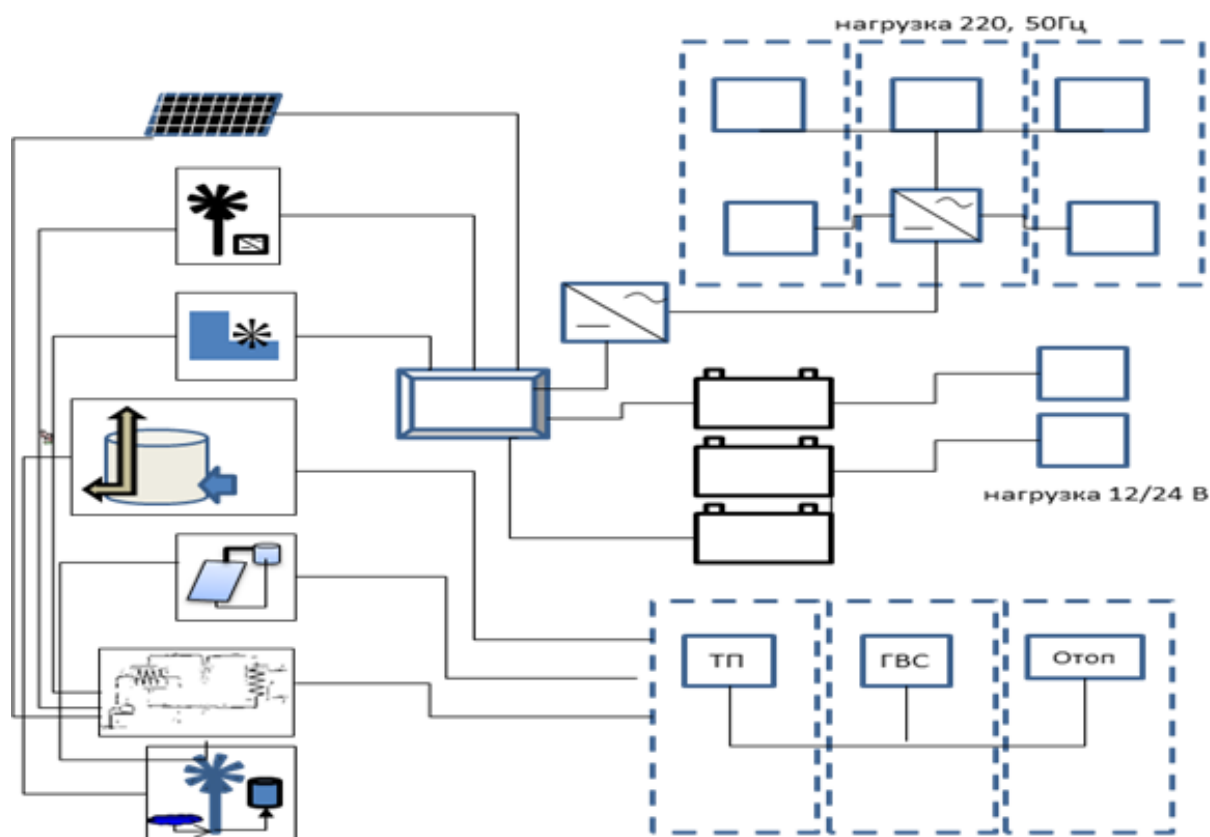


Рис. 3.1. Пример октакластера НВИЭ на объекте «Энергоэффективный дом» в составе: солнечные ФЭП; ВЭУ; микроГЭС; биогазовая установка (БГУ); солнечные коллекторы (СК); тепловой насос (ТН); ветронасос (ВН), АКБ

3.1. Разработка классификации кластеров ВИЭ по доле замещаемой мощности

Потребителю важно иметь энергию при любых условиях. Самый комфортный уровень обеспеченности энергией такой, при котором потребитель не задумывается о подключаемых нагрузках и имеет неограниченную возможность наращивания электрооборудования. Однако при возникновении нештатных ситуаций не стоит вопрос о комфорте, но требуется гарантия обеспечения ответственных потребителей: в одних случаях – аварийных систем, в других – сигнализаций, в третьих – морозильных установок и т. д.

Задачу резервирования и повышения надежности энергообеспечения могут решить возобновляемые источники энергии. Однако, учитывая дороговизну почти всех ВИЭ (кроме ГЭС), не обязательно

и, зачастую, экономически нецелесообразно приобретать оборудование ВИЭ, покрывающее 100 % потенциальных потребностей заказчика. В связи с этим важно представлять, какие варианты использования ВИЭ могут быть применены [39].

Все кластеры ВИЭ по доле замещаемой мощности условно могут быть отнесены к одному из пяти основных типов:

1. Микрокластер (Эстет)
2. Мини-кластер (Аварийный)
3. Малый
4. Средний
5. Полный

Каждый из пяти указанных типов должен надежно обеспечить определённый уровень мощности (долю энергетических потребностей) от полной потребности в энергозатратах по объекту, независимо от отсутствия какого-либо одного или более источников энергии (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Классификация кластеров ВИЭ по замещаемой мощности

Тип кластера по мощности	Доля замещаемой мощности, %
Полный F (Full)	100
Средний M (Middle)	25–50
Малый S (Small)	15–25
Мини-кластер (Аварийный) А	5–15
Микрокластер (Эстет) Э	до 5

Важнейшим условием эффективности при построении энергетической системы на основе кластерного подхода становится оптимизация внутренней структуры по типам кластера (видам ВИЭ) и мощностям.

Оптимизация внутренней структуры кластера по типам и мощностям означает выбор установленной мощности для каждого вида оборудования ВИЭ, входящего в состав энергосистемы.

Так, для микрокластера «Э» необходимой гарантированной долей (см. табл. 3.1) будет являться 5 %, которые должен обеспечить, с одной стороны, ДГ. В то же время «гибридность» «Эстет-кластера» должна быть поддержана в дуплекс-системе либо ветроустановкой соответствующей мощности, покрывающей те же 5 % потребностей, либо другим видом ВИЭ.

Таким образом, возможные сочетания по видам НВИЭ могут быть представлены следующими соотношениями (табл. 3.2):

Таблица 3.2

Примеры кластеров ВИЭ

Тип кластера по составу оборудования	Состав энергетического оборудования кластера (по видам) (вариант 1)	Состав энергетического оборудования кластера (по видам) (вариант 2)
Двойной гибрид Э-2	ДГ+ВЭУ	ВЭУ+мГЭС
Трио-кластер Э-3	ДГ+ВЭУ+ФЭП	ВЭУ+мГЭС+ ФЭП
Кватро-кластер Э-4	ДГ+ВЭУ+ФЭП+ТН	ВЭУ+ мГЭС+ФЭП+ТН
Пента-кластер Э-5	ДГ+ВЭУ+ФЭП+ТН+мГЭС	ВЭУ+мГЭС+ФЭП+ТН+СК
Сикстет-кластер Э-6	ДГ+ВЭУ+ФЭП+ТН+мГЭС+БГУ	ВЭУ+мГЭС+ФЭП+ТН+СК+БГУ

Важнейший фактор, влияющий на внедрение ВИЭ, – стоимостные характеристики оборудования. Они зависят от состояния и потенциального изменения установленной мощности, текущей и ожидаемой стоимости энергии от ВИЭ и представлены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Удельные технико-экономические параметры ВИЭ

Технологии ВИЭ	Уровень уст. мощности и её рост за 5 лет (% в год)	Удельная стоимость уст. мощ- ности (дол./кВт)	Текущая стоимость энергии новых систем (ц/кВт·ч)	Ожидаемая стоимость в будущем (ц/кВт·ч)
Электроэнергия ВЭУ	204 ГВт/25 %	1100–1700	5–13	3–10
Фотоэлектри- чество	39,8 ГВт/30 %	5000–10000	25–125	5–25
Электроэнергия от солнечных ТЭС	1,1 ГВт/5 %	3000–4000	12–18	4–10
Низкопотен- циальное тепло от солнечных коллекторов	28 ГВт(т)/8 %	500–1700	3–20	2–10
Электроэнергия от ГЭС				
- мощных	672 ГВт (2 %)	1000–3500	2–8	2–8
- малых	35 ГВт (3 %)	1200–3000	4–10	3–10
Биомасса				
- электричество	59 ГВт (3 %)	900–3000	5–15	4–10
- тепло	254 ГВт (3 %)	250–750	1–5	1–5

Необходимость введения кластерного подхода в энергообеспечении России обуславливается целым спектром уникальных особенностей нашей страны:

- протяженностью территорий;
- удаленностью потребителей от централизованных сетей;
- необходимостью (в отсутствие ВИЭ) обеспечения топливом на продолжительный период («Северный завоз»);

- малой плотностью населения в удаленных районах;
- важностью поддержания демографического уровня населения;
- необходимостью повышения качества жизни, благосостояния и даже (для некоторых районов) сохранение этноса;
- средним невысоким уровнем доходов значительной части населения.

Последнее обстоятельство для России имеет немаловажное значение в связи с невозможностью потребителя ориентироваться на кластеры «М», «F» из-за высокой удельной стоимости установленной мощности и общей цены оборудования.

При кластерном подходе конкретный состав оборудования и соотношения долей мощности НВИЭ определяется тремя основными факторами:

- энергетическим потенциалом соответствующих источников энергии (на основе данных многолетних наблюдений актинометрических характеристик потенциальной площадки размещения, региона, территории);
- удельными технико-экономическими параметрами ВИЭ (см. табл. 3.3);
- стоимостными параметрами оборудования ВИЭ в составе кластера (Э, А, S, М, F).

В рассматриваемом кластерном подходе применённая в «Энергоэффективном доме» схема обозначится как окта-кластер ВИЭ (тип А):

ДГ(1)+ВЭУ(2)+ВН(3)+СК(4)+ФЭП(5)+ТН(6)+БГУ(7)+ АКБ(8).

Кроме указанных ВИЭ, на близлежащей к «Энергоэффективному дому» плотине Верхне-Бобровского пруда была установлена переносная микроГЭС, успешные испытания которой прошли в сентябре 2011 г. Таким образом, мГЭС также может быть включена в состав как составляющая кластера ВИЭ.

Проведённые в период 2003 по 2013 гг. исследования позволили накопить практический опыт использования и оценить экономическую целесообразность применения различных типов кластеров нетрадиционных и возобновляемых источников энергии.

По своим мощностным параметрам септ-кластер «Энергоэффективного дома» покрывал до 15 % от уровня «Full» и гарантировал обеспечение 100 % минимальных потребностей, соответствующих типу кластера «А» (аварийного).

Принципиальная схема функционирования окта-кластера ВИЭ, тип «А» «Энергоэффективного дома» в п. Растущий представлена на рис. 3.2.

Для оптимизации состава оборудования по мощностям требовалось проведение комплекса исследований при различных сочетаниях ВИЭ.

Такие исследования были проведены в период с 2006 по 2013 гг.

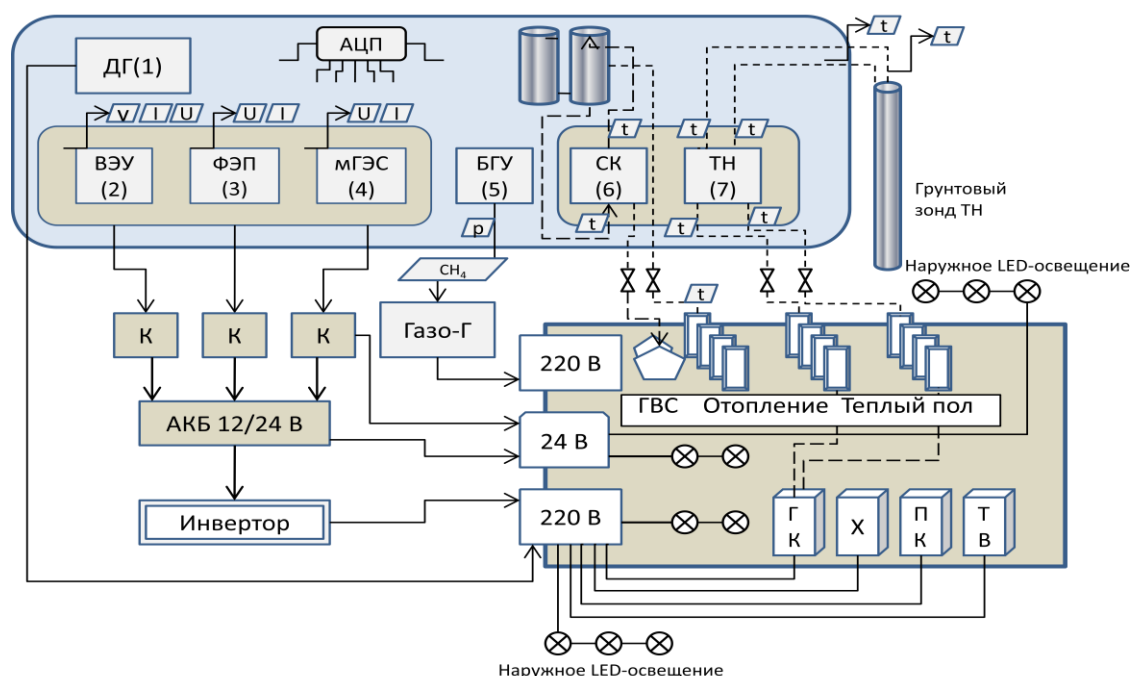


Рис. 3.2. Схема октакластера ВИЭ в энергообеспечении
«Энергоэффективного дома»

(ДГ – дизель-генератор; ВЭУ – ветроэнергетические установки;

ФЭП – фотоэлектрические преобразователи;

МГЭС – микрогидроэлектрическая станция; БГУ – биогазовая установка на отходах жизнедеятельности; СК – солнечные коллекторы; К – контроллеры;

Газо-Г – низконапорный газогенератор на очищенном биогазе;

АКБ – аккумуляторные батареи; ТН – тепловой насос с грунтовым зондом (источник низкопотенциальной энергии); Г К – газовый котел «Vaillant»;

Х – абсорбционный холодильник; П К – персональный компьютер;

Т В – телевизор, радио; LED-освещение – освещение на базе светодиодов;

АЦП – аналого-цифровой преобразователь)

3.2. Математическая модель для оптимизации кластера ВИЭ

Точные экономически оправданные соотношения многофакторных величин (в частности, мощностей ВИЭ для различных типов кластеров в различных регионах) требуют сложных математических расчетов [40]. Для решения этой задачи автором предложена математическая модель, учитывающая ряд значимых факторов.

Эффективность расчетной имитационной модели гибридного кластера в общем виде может быть представлена уравнением:

$$G_{\text{кл}} = f[v(\text{Э}, \text{А}, \text{S}, \text{М}, \text{F}); v(d, h, k, p, s, sp); CC_i; U_j], \quad (3.1)$$

где $G_{\text{кл}}$ – показатель эффективности гибридного кластера (комплекса НВИЭ);

v – совокупность факторов воздействия внешней среды: (скорость ветра (ВЭУ), инсоляция (ФЭП, СК), напор, расход (мГЭС), температура НПИ (ТН), режим метангенерации (БГУ);

Э, А, S, М, F – тип кластера в зависимости от доли замещаемой мощности (кластеры: Э – микро; А – мини; S – малый; М – средний; F – полный);

d, h, k, p, s, sp – тип кластера в зависимости от видов НВИЭ в системе:

d – двойной гибрид (ДГ+ВЭУ или ДГ+ФЭП или ДГ+ мГЭС и т. п.);

h – триокластер (ДГ+ВЭУ+ФЭП) или (ДГ+ ВЭУ+мГЭС);

k – кватрокластер (ДГ+ ВЭУ+ФЭП+мГЭС);

p – пентакластер (ДГ+ ВЭУ+ФЭП+мГЭС+ТН+БГУ);

s – сикстет-кластер (ДГ+ ВЭУ+ФЭП+мГЭС+ТН+БГУ);

sp – септ-кластер (ДГ+ ВЭУ+ФЭП+мГЭС+ТН+БГУ+СК);

CC_i – себестоимость производства 1 кВт·ч разными видами ВИЭ;

U_j – стоимость кВт установленной мощности вида ВИЭ.

По мере повышения «ранга» системы энергообеспечения с «двойного гибрида» до «септ-кластера» возникает новое качество энергопотребляющей системы:

- возрастает надежность энергообеспечения потребителя за счет резервирования другими системами ВИЭ;

- появляется возможность снижения установленной мощности дизель-генератора, а следовательно, – понижается топливная составляющая;

– снижаются затраты на поставку органического топлива и объемы выбросов.

Существенное слабое место при повышении ранга кластера ВИЭ – значительный рост его стоимости. По этой причине и необходима математическая оптимизация состава оборудования ВИЭ для любого из типов кластеров.

В общем случае для математического анализа объект исследования можно представить в виде структурной схемы, показанной на рис. 3.3.

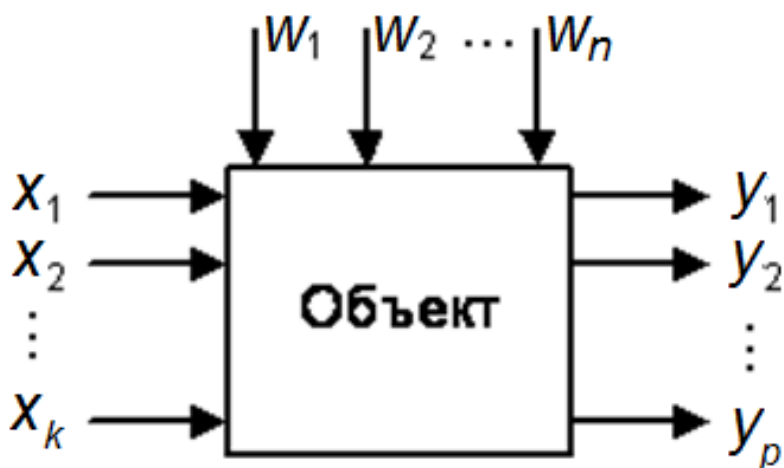


Рис. 3.3. Алгоритм функционирования многофакторной модели для ВИЭ

Представление объекта в виде такой схемы основано на принципе «черного ящика», в котором имеем следующие группы параметров:

- X_i – управляющие (входные), которые называются факторами;
- Y_i – выходные параметры, которые называются параметрами состояния;
- W_i – возмущающие воздействия.

Предполагается, что возмущающие воздействия W_i не поддаются контролю и либо являются случайными, либо меняются во времени (скорость ветра, инсоляция, температура).

Каждый фактор X_i имеет область определения, которая должна быть установлена до проведения эксперимента (себестоимость выработки кВт·ч энергии или удельная стоимость оборудования (1 кВт установленной мощности)).

Комбинацию факторов можно представить как точку в многомерном пространстве, характеризующую состояние системы.

На практике целью многофакторного эксперимента является установление зависимости:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k), \quad (3.2)$$

описывающей поведение объекта. Чаще всего функция (3.2) строится в виде полинома:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 \quad (3.3)$$

или

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{12}x_1x_2. \quad (3.4)$$

Целью эксперимента было построение зависимости (3.2) при минимальном количестве измерений значений управляющих параметров x_i .

Функция отклика объекта в случае, если $y = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$, не зависит от времени.

Оборудование ВИЭ на объекте «Энергоэффективный дом» имеет не статические, а динамические характеристики, т. е. входные факторы и параметры объекта зависят от времени. Для большинства сложных объектов характерно наличие случайных стохастических возмущений и задача идентификации требует статистических методов для определения динамических характеристик.

Нахождение оптимальных условий для исследуемого объекта – важнейшая практическая задача. Чаще всего при многофакторном эксперименте требуется найти значения факторов x_i такие, при которых отклик системы y_i принимает значения y_{\max} или y_{\min} . Таким образом, строится целевая функция отклика

$$y = y(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (3.5)$$

и задача оптимизации сводится к нахождению $x_{1 \text{ опт}}, x_{2 \text{ опт}}, \dots, x_{k \text{ опт}}$, обеспечивающих экстремум функции цели:

$$y = y(x_{1 \text{ опт}}, x_{2 \text{ опт}}, \dots, x_{k \text{ опт}}) = y_{\min} (y_{\max}). \quad (3.6)$$

Кроме того, на значения факторов накладываются дополнительные ограничения:

$$y = y(x_1, x_2, \dots, x_k) \{< = >\} R_i, \text{ где } r = 1 \dots r. \quad (3.7)$$

Таким образом, задачей оптимизации является нахождение экстремума функции отклика при том условии, что сама функция априори неизвестна. Такая задача может быть решена многими способами, например:

1. Путем полного факторного эксперимента строится нелинейная модель функции отклика и затем у этой функции находится экстремум. Такая модель может оказаться сложной и потребовать большого числа опытов, так как требования нахождения ее экстремума могут заставить проводить полный факторный эксперимент в широком диапазоне варьирования и при большом числе опытов.

2. Практически более приемлемым оказывается “пошаговый” подход к решению задачи нахождения экстремума. В этом случае эксперимент проводится в ограниченной области. Находится направление роста функции отклика (при нахождении максимума) или направление падения функции отклика (при нахождении минимума). Затем эксперимент проводится в следующей области и т. д. Таким образом, осуществляется последовательный поиск экстремума функции отклика. В этом случае задача оптимизации может быть решена без полного описания функции отклика во всей области варьирования факторов. Пошаговое движение осуществляется до попадания функции в частный оптимум (экстремум функции в выбранном направлении – кривая 1 на рис. 3.4).

В результате пошагового движения обоими методами определяем стационарную область, близкую к точке оптимума. Эта область не может быть описана гиперплоскостью и требует описания в виде нелинейной модели (гиперболоида, параболоида и т. д.).

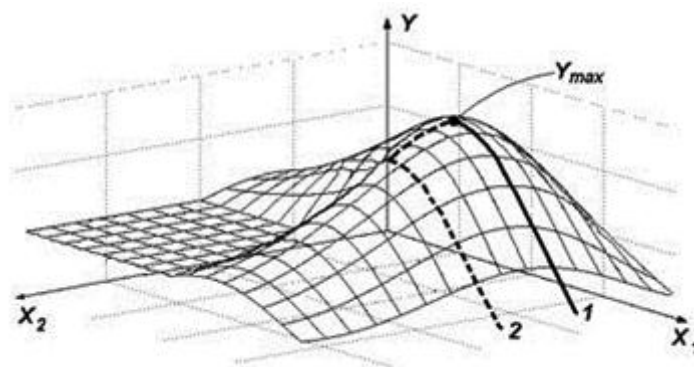


Рис. 3.4. Графическая интерпретация алгоритма многофакторной модели при определении оптимальной конфигурации кластера ВИЭ

Использование многофакторной модели позволяет определить оптимальную конфигурацию кластера ВИЭ по составу и установленной мощности оборудования. Ниже более подробно будет рассмотрена графическая модель, визуализирующая эффективность оптимального кластера ВИЭ по сравнению со случайным, характеризующимся выбором оборудования ВИЭ «на глазок».

3.3. Безрисковый и рискованные источники энергии кластера ВИЭ

В качестве критерия эффективности проектного решения по выбору оптимального кластера ВИЭ был принят критерий минимальной стоимости одного кВт·ч отпускаемой электроэнергии, при заданном простом сроке окупаемости.

Пусть имеем $n+1$ источник энергии:

работу одного из них будем считать независимой от случайных возмущений (дизель-генератор). Такой источник называется безрисковым.

Работа других n источников ВИЭ подвержена случайным возмущениям (например: использование ветровой и солнечной энергии ВЭУ+ФЭП). Это – рискованные источники, зависящие от случайных величин (ветер, солнце и т. д.).

Вводим обозначения:

количество электроэнергии, вырабатываемое кластером (в единицу времени);

r_0 – стоимость эксплуатации безрискового источника за единицу времени (здесь содержится как стоимость оборудования, так и стоимость обслуживания);

r_k – стоимость эксплуатации в течение часа k типа оборудования из рискованных источников (ВИЭ);

x_0 – доля (от a), вырабатываемая безрисковым источником (дизель-генератор);

x_k – доля (от a), вырабатываемая k рискованным источником (ВИЭ).

Измеряемые случайные величины:

Z_k – количество энергии, вырабатываемой за единицу времени k рискованным источником.

Полагаем, что для каждой из случайных величин Z_k имеется выборка из N наблюдений.

Вычисляемые (по выборке для Z_k) случайные величины:

$Y_k = r_k / Z_k$ – стоимость энергии, произведенной k -рисковым источником за единицу времени.

Тогда для каждой из случайных величин Y_k получим выборку, также состоящую из N наблюдений:

$Y / a = x_0 r_0 + x_1 Y_1 + x_2 Y_2 + \dots + x_n Y_n$ – стоимость энергии, вырабатываемой кластером за единицу времени (это случайная величина, тогда как первое слагаемое в правой части – не случайно).

По выборкам для Y_k находим:

m_k – средняя стоимость энергии, вырабатываемой k источником за единицу времени (выборочное среднее по Y_k);

m_2 – средняя стоимость 1 кВт·ч, вырабатываемого солнцем (выборочное среднее по Y_2);

$m = M(Y / a) = x_0 r_0 + x_1 m_1 + x_2 m_2$ – средняя стоимость энергии, вырабатываемой кластером за единицу времени;

A – допустимый уровень средней стоимости 1 кВт·ч, вырабатываемого кластером ($A < r_0$).

3.4. Постановка и решение задачи поиска оптимального кластера ВИЭ

Поиск оптимального по составу оборудования кластера ВИЭ необходим для снижения средств на первоначальные затраты по приобретению эффективной и независимой системы энерго-снабжения.

Выпишем $D(Y/a)$ – дисперсию стоимости для энергии, вырабатываемой кластером ВИЭ за единицу времени. Эта величина была выбрана в качестве целевой функции для кластера ВИЭ (квадратичная функция от x_1, x_2, \dots, x_n следующего вида):

$$D(Y / a) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sigma_{ij} x_i x_j, \quad (3.8)$$

где x_i – доли установленной мощности каждого из видов возобновляемых источников энергии, входящих в кластер ВИЭ;

σ_{ij} – выборочная ковариация, посчитанная по выборкам для Y_i, Y_j при следующих ограничениях:

$$x_0 + x_1 + x_2 + \dots + x_n = 1;$$

$$x_0 r_0 + x_1 m_1 + \dots + x_n m_n = A;$$

$$x_i \geq 0, \quad i = 0, 1, \dots, n;$$

$$A < r_0.$$

Физический смысл функции – дисперсия стоимости энергии, вырабатываемой кластером ВИЭ за единицу времени.

Используя аналогию с математической теорией Шарпа-Марковица (для рискованных портфельных инвестиций) и Дж. Тобина (для рискованных и безрисковых) работу одного из источников энергии ($n+1$) будем считать независимой от случайных возмущений (дизель-генератор). Такой источник называется безрисковым.

Работа других n источников ВИЭ подвержена случайным возмущениям (например: использование ветровой и солнечной энергии ВЭУ+ФЭП). Это – рискованные источники, зависящие от случайных величин (ветер, солнце и т. д.). Таким образом, как и в случаях с финансовыми активами Марковица-Шарпа-Дж. Тобина, описанными выше, изменения скорости ветра и инсоляция носят стохастический характер.

Область значений квадратичной функции, определяемая гиперболой, представлена в графической интерпретации на рис. 3.5.



Рис. 3.5. Графическая интерпретация поиска оптимального кластера ВИЭ

Это – задача выпуклого программирования, которая решается, используя модуль «поиск решения» в Excel. В результате получим вектор (x_0, x_1, \dots, x_n) , задающий оптимальный кластер ВИЭ (кривая, называемая в математике «пулей Марковица» ввиду схожести профиля кривой с формой пули).

Задача такого типа известна в инвестиционном анализе, где соответствующая модель, содержащая как рискованные так и безрисковые вложения, называется портфелем Тобина [41].

В упрощенном варианте (без ограничений типа неравенства) решение этой задачи может быть выписано аналитически.

Для такого оптимального кластера структура рискованной части кластера не зависит от A . Это означает, что пропорции, в которых используются рискованные источники энергии (для данной модели кластера – пропорции установленных мощностей ВЭУ и ФЭП), определяются исключительно вектором, состоящим из математических ожиданий m_k , и матрицей ковариаций с компонентами σ_{ij} , и могут быть найдены по выборкам для Z_k .

На основе решения (3.8) были определены значения целевых функций и составлены таблицы оптимальных сочетаний ВИЭ для различных кластеров.

Для подтверждения эффективности теоретических построений необходимо было сопоставить расчетные характеристики с экспериментальными данными, накопленными за период эксплуатации дома. Вспомним, что «Энергоэффективный дом» представляет собой жилой объект в составе 8 сблокированных квартир (коттеджей) в таун-хаусе. В каждой квартире-коттедже был «смонтирован» свой кластер ВИЭ. Состав кластеров по квартирам следующий:

1 кв. – октакластер (ДГ + ВЭУ + ФЭП + мГЭС + СК + ТН + БГУ + АКБ);

2 кв. – пентакластер ВИЭ (ДГ + ВЭУ + ФЭП + СК + АКБ)

3, 4, 5 кв. – дуплекс-кластер ВИЭ (ДГ + ВЭУ)

6 кв. – триокластер ВИЭ (ДГ + ФЭП + АКБ)

7 кв. – септ-кластер ВИЭ (ДГ + ФЭП + ВЭУ + СК + ВН + мГЭС + АКБ)

8 кв. – кватрокластер ВИЭ (ДГ + ФЭП + СК + АКБ)

Высокий уровень подобия каждого из объектов (высота потолков, площади и объем помещений, теплозащитные характеристики, расположение отопительных приборов, окон и т. д.), содержащих в себе различные кластеры ВИЭ, способствовал хорошей сопоставимости полученных экспериментальных данных и достоверности сравнения с расчетными показателями. В качестве критерия эффективности кластера ВИЭ была принята минимальная стоимость выработки одного кВт·ч электроэнергии, при заданном простом сроке окупаемости.

На рис. 3.6 представлена схема размещения кластеров ВИЭ в «Энергоэффективном доме».

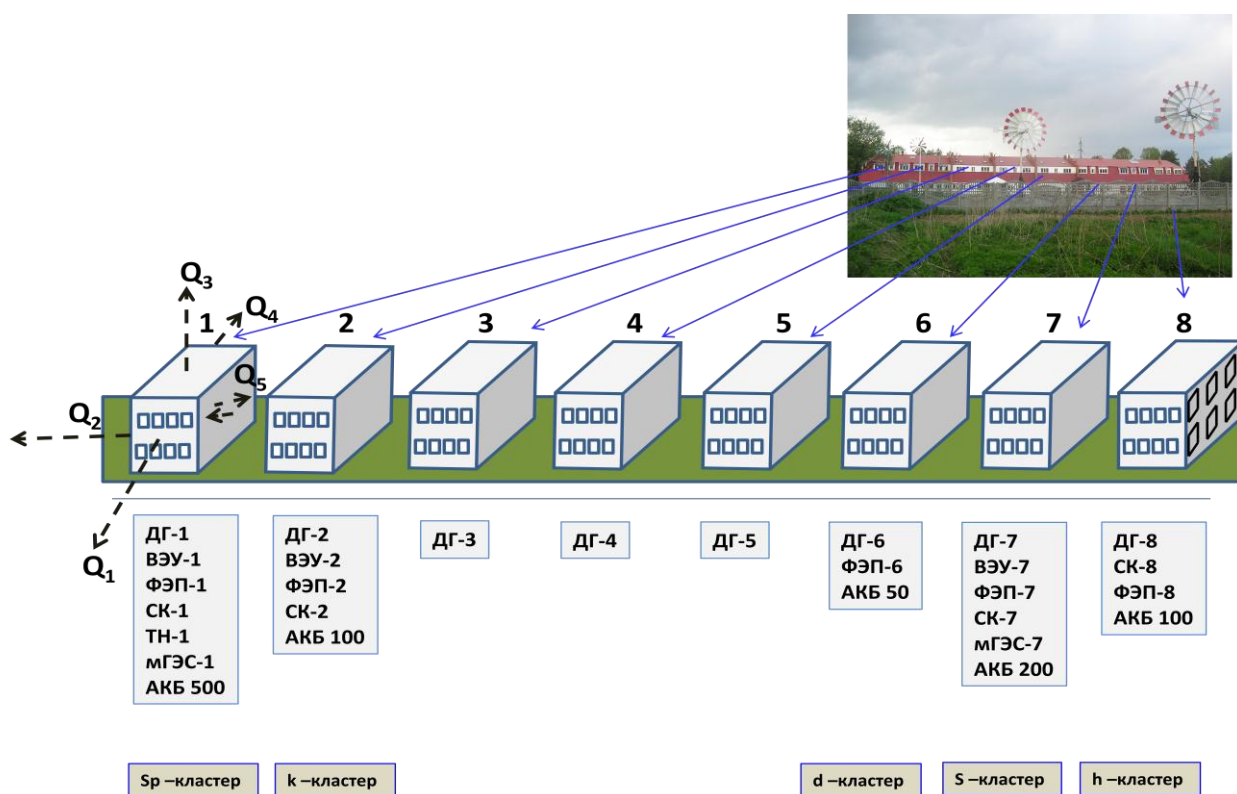


Рис. 3.6. Схема размещения кластеров ВИЭ в «Энергоэффективном доме»

На основе предложенного алгоритма расчета (см. рис. 3.7) оптимальных долей каждого из возобновляемых источников энергии, входящих в состав кластеров ВИЭ, была разработана, апробирована и зарегистрирована автоматизированная программа для быстрого определения искомых параметров кластера ВИЭ (АРК-ВИЭ) [42].

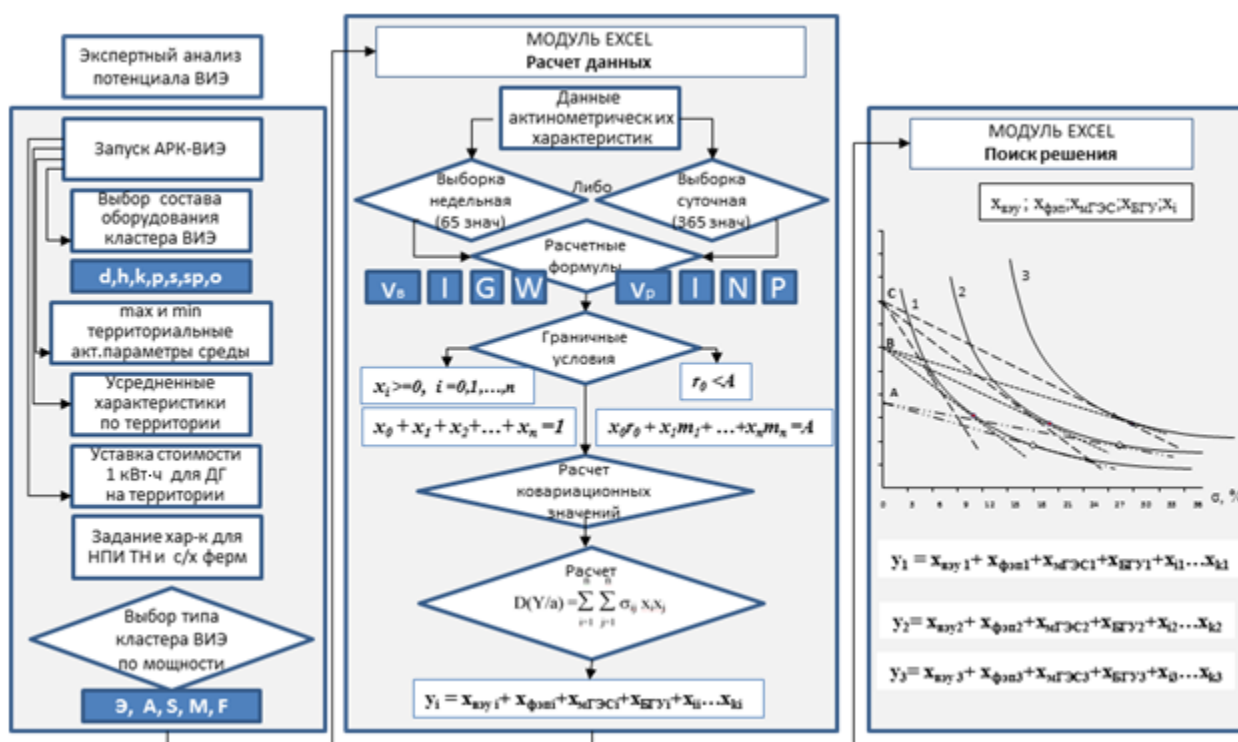


Рис. 3.7. Алгоритм расчета оптимального кластера ВИЭ на основе стохастических данных многолетних наблюдений за актинометрическими характеристиками

На основе имеющихся экспериментальных данных и значений, полученных расчетным путем, был построен график, визуализирующий эффективность каждого кластера ВИЭ в «Энергоэффективном доме» (рис. 3.7).

Кривая, описывающая область возможных значений возобновляемых источников энергии, называется в экономическом анализе «пуля Марковица», т. к. по своему внешнему виду напоминает пулю.

Значения вне области «пули Марковица» считаются невозможными. Значения на нижней части линии «пули Марковица» характеризуют оптимальные соотношения долей установленных мощностей оборудования ВИЭ (x_i). Оптимальным считается кластер ВИЭ, образованный касательной к «пуле Марковица», исходящей из показателя стоимости выработки кВт·ч на безрисковом источнике энергии (дизель-генераторе) в месте расположения объекта.

Все кластеры ВИЭ в «Энергоэффективном доме», сформированные без научно обоснованной конфигурации, не соответствовали оптимальному соотношению долей установленной мощности между

видами оборудования ВИЭ, т. к. были подобраны «на глазок», вследствие чего имеют резерв повышения эффективности. Этот резерв определяется величиной 2–5 руб. за каждый вырабатываемый 1 кВт·ч энергии, что соответствует недовыработке (или потере) 20–50 % потенциальной мощности установленного оборудования ВИЭ [43].

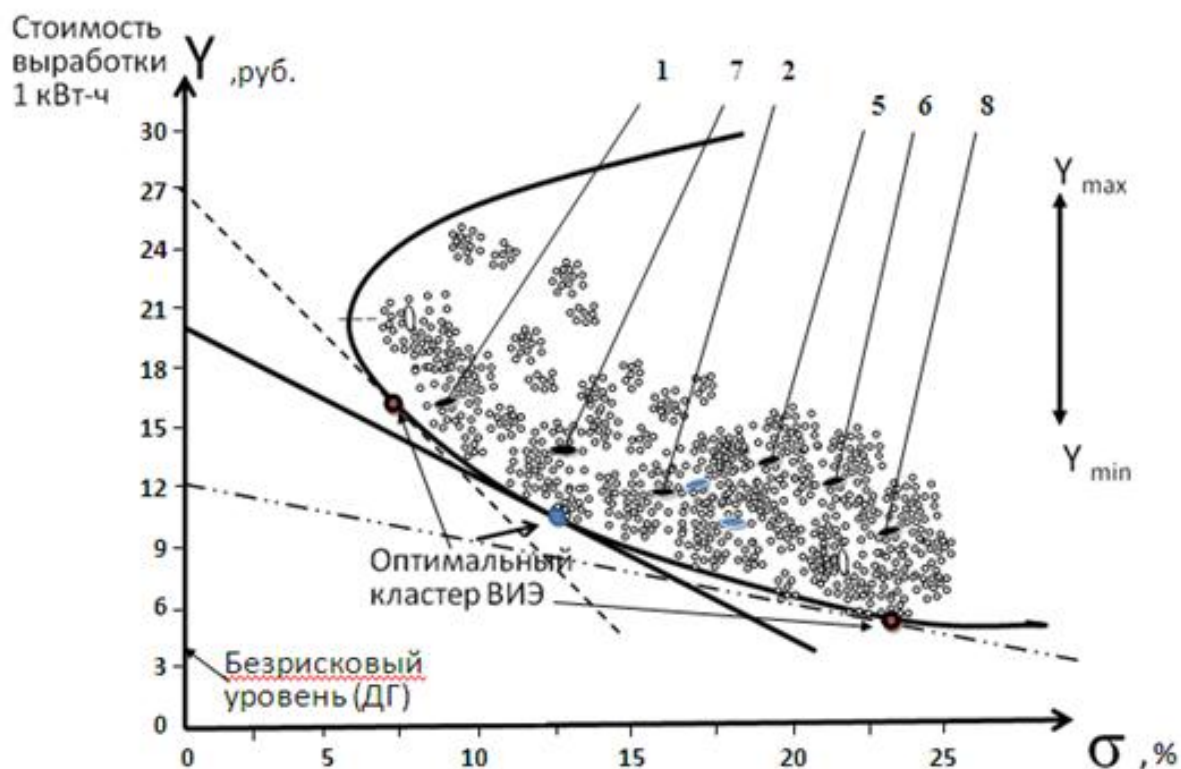


Рис. 3.8. Сравнение оптимальных расчетных (область пули Марковица) и экспериментальных данных кластеров ВИЭ в квартирах (коттеджах) 1–8 «Энергоэффективного дома»

- 1 – Октакластер ВИЭ (котт. 1); 2 – пентакластер ВИЭ (котт. 2);
 5 – дуплекс-кластер ВИЭ (котт. 3, 4, 5); 6 – триокластер ВИЭ (котт. 6);
 7 – септ-кластер ВИЭ (котт. 7); 8 – кватрокластер ВИЭ (котт. 8)

Из графика очевидно, что практически в каждой квартире «Энергоэффективного дома» имеется значительный запас до оптимальной эффективности кластера ВИЭ. Это, в свою очередь, означает, что при приобретении оборудования ВИЭ заказчиком были затрачены существенные ресурсы, превышающие оптимальные потребности.

Ещё одним подтверждением эффективности применения рассматриваемой теории оптимального кластера ВИЭ и использования «АРК-ВИЭ» может служить графическая модель расчетного и поставляемого в составе оборудования, импортируемого из КНР (рис. 3.9). Состав оборудования кластера ВИЭ, поставляемого из КНР, представлен в микротаблице (1), а оптимизированный на базе той же номенклатуры кластер ВИЭ – в (2).

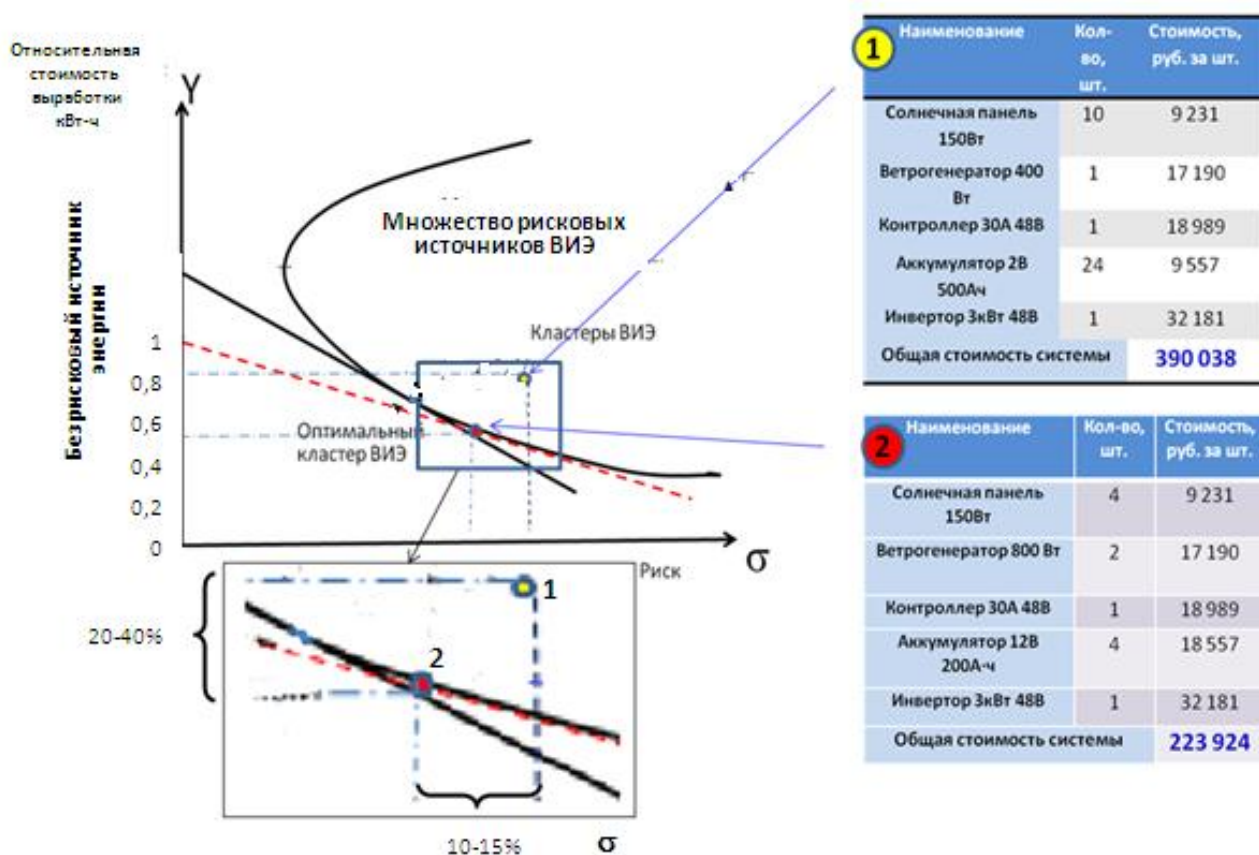


Рис. 3.9. Графическая модель сравнения штатного комплекта *d*-кластера ВИЭ КНР (1) и оптимизированного по программе «АРК-ВИЭ» кластера ВИЭ (2) того же производителя

Из графика следует, что себестоимость выработки энергии кластером ВИЭ КНР на 20–40 % выше (точки 1 и 2 на увеличенном фрагменте графика), при этом риск (вероятность отсутствия выработки энергии из-за низкопотенциального ветра и низкой инсоляции) оптимизированного кластера ВИЭ на 10–15 % ниже.

Результаты сравнения выработки электроэнергии кластерами ВИЭ КНР и оптимизированного представлены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

**Сравнительный анализ штатного (КНР) и оптимизированного
кластеров ВИЭ**

Показатель (рассчитан для условий Уральского региона)	КНР	АРК- ВИЭ
Выработка электроэнергии в зимний период (декабрь), кВт·ч/ мес.	40	92
Выработка электроэнергии в летний период (апрель–сентябрь), кВт·ч/мес.	159,9	101,0
Общая стоимость <i>d</i> -кластера ВИЭ (тыс. руб.) (ВЭУ + ФЭП)	390	224

Из таблицы следует, что комплект поставляемого из КНР оборудования (без оптимизации ВЭУ и ФЭП по мощности) в два раза дороже, а выработка электроэнергии в критически важный зимний период в условиях Уральского региона более чем в два раза ниже, чем у оптимизированного с помощью предложенного алгоритма «АРК-ВИЭ». Суммарная выработка энергии за год кластером ВИЭ КНР даже чуть превышает оптимизированный кластер ВИЭ, однако это достигается за счёт повышенной выработки энергии в летний период. Причем избыток энергии от кластера ВИЭ КНР накапливать нигде (летом аккумуляторы успевают быстро заряжаться на 100 %), а «сбрасывать» излишки в сеть не позволяет законодательство РФ.

Графическая модель нахождения оптимального кластера ВИЭ для территорий, имеющих различные актинометрические характеристики и удаленность от ЛЭП, представлена на рис. 3.10.

Оптимальный кластер ВИЭ находится в точке касательной, исходящей от уровня относительной стоимости выработки 1 кВт·ч на безрисковом источнике энергии (ДГ) (точки А; В; С), к соответствующей гиперболе (1–5). При этом каждая из трех шкал оси ординат относится к соответствующему уровню стоимости выработки 1 кВт·ч и может быть (в принципе) оценена в абсолютных единицах для конкретного региона расположения кластера ВИЭ.

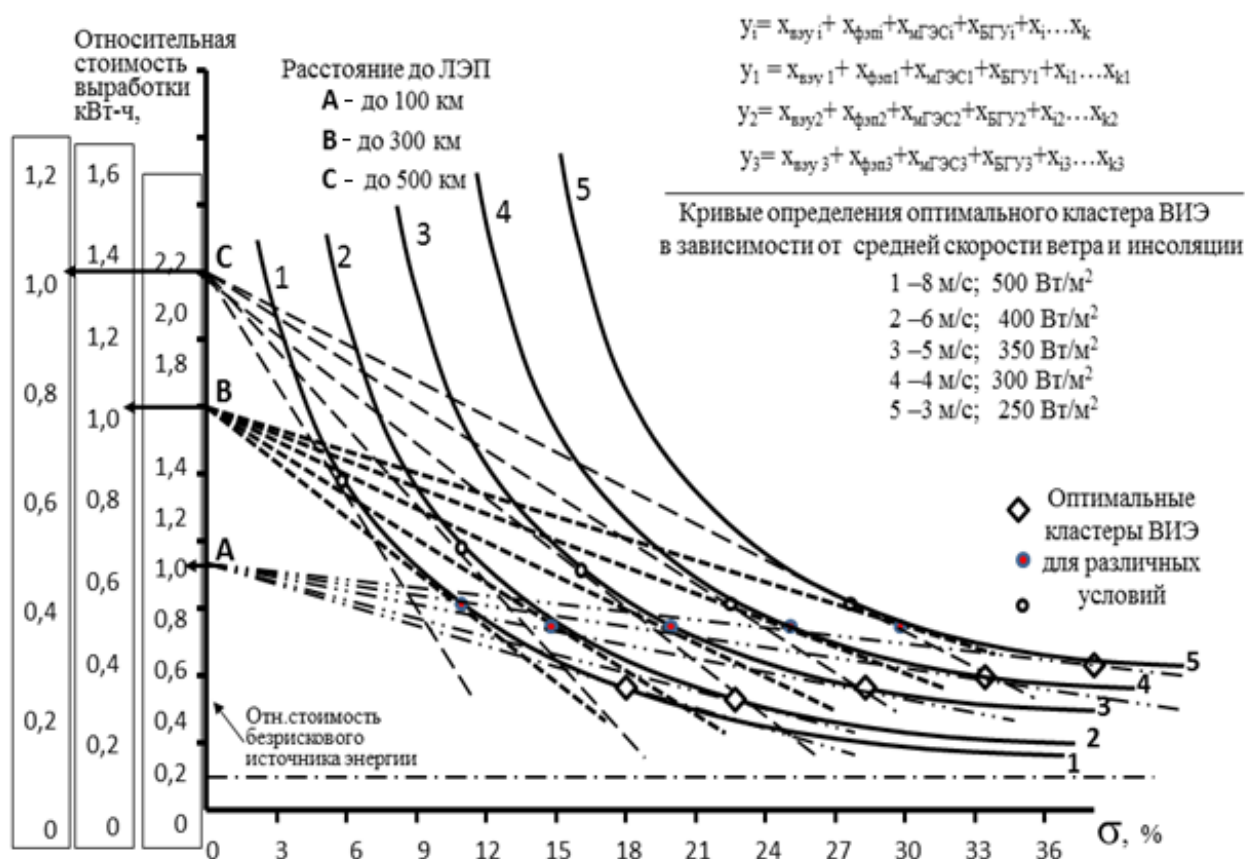


Рис. 3.10. График для определения оптимальных кластеров ВИЭ в зависимости от относительной стоимости выработки кВт·ч как функции расстояния до централизованных источников энергии (ЛЭП) и актинометрических характеристик на территории потребителя

На основе данных актинометрических характеристик различных территорий Свердловской области, а также с учетом потенциального использования ВИЭ (наличие рядом с населенными пунктами плотин, прудов, рек, сельскохозяйственных ферм, возвышенностей рельефа) с помощью «АРК-ВИЭ» были определены районы потенциального размещения кластеров ВИЭ оптимального состава оборудования и мощности.

Рекомендованные участки территорий Свердловской области с рассчитанными оптимальными по составу оборудования и мощности кластерами ВИЭ (А – Восточное предгорье Уральских гор; В, С – районы Уральского хребта, Д – равнинные участки центральной части области) показаны на рис. 3.11.



Рис. 3.11. Карта Свердловской области с участками территорий (А, В, С, Д), соответствующими оптимальным кластерам ВИЭ

Возможность определения оптимального состава кластера ВИЭ для конкретной территории и с учетом потребностей заказчика является одним из важнейших стимулирующих факторов для повышения интереса потребителей к возобновляемым источникам энергии, ускорения их внедрения и реализации намеченных индикаторов в развитии ВИЭ в России.

3.5. Разработка компьютерной программы расчета оптимального кластера ВИЭ с использованием модуля «Поиск решения»

Программа автоматизированного расчета оптимального кластера ВИЭ реализована на базе пакета стандартной программы Excel.

На основе предложенного выше алгоритма расчета оптимальных долей каждого из возобновляемых источников энергии, входящих в состав кластера ВИЭ, была разработана и апробирована автоматизированная программа для быстрого определения искомых параметров. В теле программы заложена идеология и «прошиты» алгоритмы, приведённые в разделах 3.3, 3.4 и 3.5. Вариант окна меню программы расчета оптимального сикстет-кластера ВИЭ представлен на рис. 3.12.

Microsoft Excel

Главная

Вставка

Разметка страницы

Формулы

Данные

Рецензирование

Вид

Получить внешние данные

Обновить все

Подключения

Свойства

Изменить связь

Сортировка

Фильтр

Сортировка и фильтр

Очистить

Применить повторно

Дополнительно

Текст по столбцам

Удалить дубликаты

Работа с данными

Структура

Поиск решения

Анализ

C8

fx

Солнечный коллектор (СК)

16-й 15.09.2012 ВВМ																																				
	A	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U																
4		Состав кластера:	Расчетные доли		Мощность установок, кВт-ч	Характеристики			Средние региональные показатели			Минимальный показатель для начала работы установки			Максимальный показатель для возможности работы установки			Стоимость выработки 1 кВт-ч, руб																		
5		Дизель генератор (ДГ)	<input checked="" type="checkbox"/> 0,210	3		Потребляемое к-во топлива, л/час	1,2		Стоимость топлива, руб	25										30																
6		Ветроэлектрическая установка (ВЭУ)	<input checked="" type="checkbox"/> 0,110	4		Диаметр ВЭУ, м	15		Скорость ветра, м/с	6		Скорость ветра, м/с	3,5		Скорость ветра, м/с	20				3,5																
7		Фотоэлектрический преобразователь (ФЭП)	<input checked="" type="checkbox"/> 0,080	2		Площадь СЭС S _{ср} , м ²	20		Инсоляция, Вт/м ²	400		Инсоляция, Вт/м ²	150		Инсоляция, Вт/м ²	850				29																
8		Солнечный коллектор (СК)	<input checked="" type="checkbox"/> 0,200	4		Площадь СК S _{ск} , м ²	20		Инсоляция, Вт/м ²	400		Инсоляция, Вт/м ²	150		Инсоляция, Вт/м ²	850				5																
9		Солнечный коллектор вакуумный (СК вак)	<input type="checkbox"/>																																	
10		Микро-гидроэлектростанция-1 (мГЭС-1)	<input checked="" type="checkbox"/> 0,190	1		Диаметр г/колеса, м	0,5		Скорость воды, м/с	3,2		Скорость воды, м/с	0,1		Скорость воды, м/с	20				2,9																
11		Микро-гидроэлектростанция-2 (мГЭС-2)	<input type="checkbox"/>																																	
12		Биогазовая установка (БГУ)	<input checked="" type="checkbox"/> 0,210	2,5		Кол-во КРС, голов	100		Кол-во свиней, голов	0		Кол-во птиц, голов	0							3																
13		Тепловой насос (ТН)	<input type="checkbox"/>																																	
14		Тип кластера по составу оборудования	Максимальная мощность кластера, кВт-ч		Доля замещаемой мощности				Коэффициент допустимой стоимости 1 кВт-ч кластера В																											
15		Сикстет-кластер	3,0		25%														1,5																	
16		Тип кластера по мощности																																		
17		S - малый																																		

Рис. 3.12. Вариант экранного меню программы автоматизированного поиска оптимального кластера ВИЭ «Арко-ВИЭ»

На основе решения (3.8) были определены значения целевых функций и составлены таблицы оптимальных сочетаний НВИЭ для различных кластеров.

Для корректного функционирования программы требуется ввести следующие данные в сплывающие окна:

для автоматического определения типа кластера (Э, А, S, М, F) задаются

– вид НВИЭ (ВИЭ, ФЭП, СК_{пл}, СК_{вак}, мГЭС, БГУ, ТН);

для расчета дисперсий (отклонений от средних) задаются значения:

- скорость ветра (от 0 до 25 м/с);
- плотность инсоляции (от 100 до 1000 Вт /м² с шагом 50);
- скорость течения реки (от 0 до 20 м/с с шагом 1);
- перепад высот на ГТС (от 1 до 100 м с шагом 2).

Основным требованием корректного расчета кластера ВИЭ автоматизированной программой АРК-ВИЭ является внесение массива данных актинометрических характеристик (скорость ветра, показатели инсоляции) для конкретной территории. Чем больше период сбора стохастических параметров, внесенных в программу, тем точнее будет выполнен расчет оптимального кластера ВИЭ.

Для расчета стоимостных параметров и сравнения с безрисковым источником энергии вводятся:

- себестоимость выработки энергии безрисковых источников энергии (дизель-генератором);
- себестоимость выработки 1 кВт·ч на каждом из видов НВИЭ.

Для поиска оптимального соотношения долей мощности каждого вида оборудования ВИЭ запускается автоматизированный расчет «Поиск решения».

Искомым результатом расчета являются показатели долей мощности оборудования в составе выбранного кластера.

Например, $x_1 = 0,25$; $x_2 = 0,05$; $x_3 = 0,12$; $x_0 = 0,4$; $x_9 = 0,19$.

Указанные соотношения определяют, что оптимальным для данного региона (местности, территории, муниципального образования) являются следующие соотношения по установленным мощностям оборудования:

ДГ – 40 %; ВЭУ – 25 %, ФЭП – 12 %; БГУ – 19%.

Таким образом, разработанный алгоритм определения оптимального состава оборудования ВИЭ (по видам и долям установленной мощности) позволяет быстро ответить на вопрос: какой вид ВИЭ и в каких долях мощности между собой будет являться оптимальным с т. з. минимальной стоимости выработки 1 кВт·ч энергии для данных территориально-климатических условий.

Выводы:

– Точный (с т. з. и номенклатуры, и установленных мощностей) выбор видов ВИЭ на основе научного анализа и кластерного подхода гарантирует в районах с резко континентальным климатом России повышение надежности электрообеспечения потребителей и поддержание минимально необходимого уровня значений мощностей.

– Расчетная модель эффективности кластера позволяет оптимизировать кластер ВИЭ по составу оборудования и критерию минимальной стоимости выработки 1 кВт·ч.

Использование программы автоматизированного расчета оптимального кластера ВИЭ уже дает экономический эффект, заключающийся в увеличившихся объемах закупок дуплекс-кластеров ВИЭ (ВЭУ + ФЭП) за счет оптимизации их цены (снижение в 1,8) и повышения эффективности выработки электроэнергии (выработка в декабре возросла в результате точной оптимизации состава оборудования ВИЭ в 2 раза).

3.6. Разработка модульных микро-кластеров ВИЭ высокой заводской готовности

В мае 2013 г. Правительство России приняло Постановление №449 «О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности».

На X Международной конференции по возобновляемой энергетике (Москва, 17–19.06.2013, Экспоцентр) оно было рассмотрено участниками – сообществом специалистов-профессионалов, много лет занимающихся вопросами развития и внедрения возобновляемой энергетики в России.

Как уже отмечалось, Постановление, к сожалению, касается только трех ВИЭ: гидро-, ветро- и солнечных электрогенерирующих установок (не затронуты биоэнергетика, геотермальная энергетика). Кроме того, поддержку на уровне Правительства получают только владельцы установок мощностью 5 и более мегаватт. Таким образом,

из практики стимулирования исключается мелкий потребитель – частник, желающий приобрести, внедрить и использовать ВИЭ.

В этой связи для поддержания многочисленных частных хозяйств, потребителей на удаленных децентрализованных территориях ещё актуальнее становится задача разработки новых малых систем ВИЭ мощностью от единиц киловатт до 5 МВт и их оптимизация с задачей комплексного использования имеющегося на конкретной территории энергетического потенциала ВИЭ в условиях России.

Одним из решений такой задачи может быть применение кластерного подхода во внедрении ВИЭ вообще и внедрение мобильных кластеров ВИЭ высокой (модульной) заводской готовности в частности.

В условиях России такой подход для большей части территории страны, особенно для удаленных децентрализованных территорий, оправдан.

Основная идея модульного кластера ВИЭ – создание модульной контейнерной конструкции с размещением в ней оборудования ВИЭ, оптимизированного под конкретные условия территории (с учетом актинометрических характеристик, наличия гидротехнических сооружений, рельефа местности, окружающей растительности, сельскохозяйственных производств). Размещение оборудования в контейнере выполняется в соответствии с требованиями эргономики, ОТ и ТБ и удобства транспортировки, ввода в эксплуатацию и пользования потребителем. Возможный набор основного оборудования в составе модульного кластера ВИЭ: ДГ, ФЭП, ВЭУ, мГЭС, ТН и БГУ.

Для обеспечения задач эффективного функционирования контейнер оборудован вспомогательными устройствами: инвертором, контроллером, АКБ, LED-светильниками, ШР, набором кабелей, комплектом розеток. Пример кластера ВИЭ в модульном исполнении приведён на рис. 3.13.

Комплектация оборудования контейнерного кластера ВИЭ в максимальном составе представлена в табл. 3.5.



Рис. 3.13. Модульный микро-кластер ВИЭ высокой заводской готовности с развернутой в рабочее состояние ветроустановкой «Кардэя» [44]

В зависимости от конкретных территориально-климатических параметров и возможностей заказчика состав оборудования может быть изменен.

Таблица 3.5

Характеристики основного и вспомогательного оборудования ВИЭ в транспортном контейнере

№ п/п	Оборудование	Ед. мощность, Вт	Кол- во	Суммарная мощность, кВт
1	Солнечные панели ФЭП	100	20	2,0
2	Ветроэнергетическая установка	2000	1	2,0
3	АКБ гелевые (Ач)*	100*	10	1000*
4	Контроллер	2000	2	4,0
5	Инвертор	4000	1	4,0
6	Дизель-генератор (аварийно-резервный)	4000	1	4,0
7	мГЭС с ротором «Банки»	2500	1	2,5
8	Солнечные коллекторы КУМЗ	1800 (т)	2	3,6 (т)

№ п/п	Оборудование	Ед. мощность, Вт	Кол- во	Суммарная мощность, кВт
9	Шкаф распределительный		1	
10	Пульт управления		1	
10	Набор подключенных розеток		5–10	
11	Шлейф (кабель к потребителю) (м)	100 м	1	—
12	Аппаратура КИП и дистанционного контроля	комплект	1	—
13	Резервная емкость для аварийного запаса горючего (л)	200	1	

Применение кластеров ВИЭ, по сравнению с монокомплексами возобновляемой энергетики, обусловлено большими рисками остаться без энергообеспечения по причине объективного (естественно-природного) отсутствия одного из возобновляемых источников энергии (солнца, ветра).

Актуальность применения модульных установок высокой заводской готовности обусловлена для России целым рядом обстоятельств:

- необходимостью повышения надежности энергообеспечения децентрализованных потребителей;
- требованием высокого уровня готовности оборудования к развертыванию и запуску;
- отсутствием навыков эксплуатации высокотехнологичного оборудования у населения;
- удаленностью территорий расположения объектов потребителя и отсутствием сервисного обслуживания в течение длительного времени.

Среди задач, которые могли бы решать кластеры ВИЭ в модульном исполнении, могут быть следующие:

- катодная защита подземных участков нефте- и газопроводов;

– обеспечение электрической и тепловой энергией коттеджных поселков и коллективных садов, метеостанций, геологических партий, пастбищ и пасек;

– энергоснабжение удаленных или децентрализованных объектов инфраструктуры: мачт сотовой связи, маяков, систем связи и военных объектов.

Линейка кластеров ВИЭ в модульном исполнении может представлять из себя:

по мощности (кВт): 0,3; 0,5; 1,0; 1,5; 4,0; 8,0; 16,0;

по составу оборудования кластера ВИЭ:

h-кластер ВИЭ (ДГ + ВЭУ + АКБ) или (ФЭП + ВЭУ + АКБ);

k-кластер ВИЭ (ФЭП + ВЭУ + мГЭС + АКБ) или (ДГ + ФЭП + ВЭУ + АКБ);

p-кластер ВИЭ (ДГ + ФЭП + ВЭУ + мГЭС + АКБ) или (ФЭП + ВЭУ + СК + ТН + АКБ);

s-кластер ВИЭ (ДГ+ФЭП+ВЭУ+мГЭС+БГУ+АКБ).

Уточненная конфигурация (состава и мощности каждого вида оборудования) кластера ВИЭ зависит от конкретных условий территории, на которой предполагается его использование.

В настоящее время разработку модульных кластеров ВИЭ ведёт компания «Контактор-М» (Екатеринбург) при научном сопровождении кафедры АС и ВИЭ Уральского федерального университета.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возобновляемая энергетика начала свое поступательное движение в последней четверти прошлого века. Казалось бы, ввиду наращивания выпуска и внедрения ВИЭ удельная стоимость оборудования будет снижаться. Однако существенных темпов снижения стоимости в последнее время не происходит.

В то же время для специалистов безусловна бесконечность источников возобновляемой энергетики и конечность органических.

Технологическое продвижение цивилизации идет по пути интегрирования различных систем, снижения массогабаритных характеристик, повышения надежности и автономности, создания гибридов, использования композитных материалов и снижения удельного энергопотребления.

В этой связи использование кластерных систем энергоснабжения на основе ВИЭ на территории Российской Федерации может определить новый подход к внедрению оборудования возобновляемой энергетики в мире, позволит заказчику или потребителю выбирать наиболее целесообразный кластер ВИЭ для удаленных децентрализованных районов, оптимизировать его по составу и мощности, что в свою очередь приведёт к повышению надежности энергообеспечения, снижению суммарных затрат и в целом – к росту энергетической эффективности.

Разработанная методология применения кластеров ВИЭ позволяет на основе многолетних актинометрических характеристик определять для конкретных территорий оптимальный состав и установленную мощность каждого вида оборудования [45].

Разработанный алгоритм позволяет применить предложенную дискретную стохастическую математическую модель для любой территории, по которой имеются достоверные статистические актинометрические характеристики за относительно большой временной промежуток наблюдений.

Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии, ввиду неизбежности удорожания и истощения органических ресурсов, а в перспективе и ядерных материалов для функционирования атомной

энергетики – стратегическое будущее человечества. Каждое исследование или эксперимент в направлении развития ВИЭ приближают к более эффективному их использованию.

В рассмотренном кластерном подходе, как и во многом, что отличает специфику России, заключена потенциальная возможность ускорения внедрения ВИЭ там, где это уже сегодня необходимо. Автор надеется, что методология и алгоритмы расчета оптимального кластера ВИЭ, приведённые в монографии, могут послужить значительному повышению мотивации для внедрения возобновляемых источников энергии "на" децентрализованных территориях бескрайних просторов страны.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Миркин Б. Г. Методы кластер-анализа для поддержки принятия решения : обзор / Б. Г. Миркин // Серия WP7 : математические методы анализа решений в экономике, бизнесе, политике. М., 2011. 86 с.
2. Безруких П. П. Состояние и перспективы развития возобновляемых источников энергии в России / П. П. Безруких, Д. С. Стребков // Малая энергетика. М. : ОАО «НИИЭС», 2008. №4–5.
3. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года // Распоряжение Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. №1715-р.
4. Купершток В. Л. Сумма внутренних связей как критерий качества классификации / В. Л. Купершток, Б. Г. Миркин // Автоматика и телемеханика. 1976. №3. С. 91–100.
5. Смирнов Е. С. Таксономический анализ / Е. С. Смирнов. М. : МГУ, 1969.
6. Лбов Г. С. Группировка объектов в пространстве разнотипных переменных / Г. С. Лбов, Т. М. Пестунова // Анализ нечисловой информации в социологических исследованиях. М. : Наука, 1985. С. 141–149.
7. Ширяев В. И. Модели финансовых рынков: Оптимальные портфели, управление финансами и рисками : учебное пособие / В. И. Ширяев. 2-е изд. М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 216 с.
8. Безруких П. П. Возобновляемая энергетика: стратегия, ресурсы, технология / П. П. Безруких, Д. С. Стребков. М. : ВИЭСХ, 2005. 263 с.
9. Global Wind 2010 Report. WWEA-Global Wind Energy Council, Brussels, 2011.
10. Стребков Д. С. Практические рекомендации по определению удельных показателей энергозатрат и потребностей в топливно-энергетических ресурсах / Д. С. Стребков. М. : ВИЭСХ, 2008. 96 с.

11. Стребков Д. С. Возможность передачи электрической энергии без металлических проводов / Д. С. Стребков // Доклады РАСХН. 2002. №1. С. 47–50.
12. Справочник по ресурсам ВИЭ России и местным видам топлива / П. П. Безруких, В. В. Дегтярев, В. В. Елистратов, У. С. Панцхава и др. М. : ИАЦ Энергия, 2007.
13. Климатические факторы возобновляемых источников энергии / В. В. Елистратов, Е. М. Акентьева, М. М. Борисенко, Н. В. Кобышева, Г. И. Сидоренко, В. В. Стадник. СПб. : Наука, 2010. 235 с.
14. Оценки ресурсов возобновляемых источников в России / Ю. С. Васильев, П. П. Безруких, В. В. Елистратов, Г. И. Сидоренко. СПб: Изд. Политех. университета, 2009. 251 с.
15. Виссарионов В. И. Методика расчета энергетического комплекса для тепло- и электроснабжения автономного потребителя на базе возобновляемых источников энергии / В. И. Виссарионов, А. Н. Дорошин // Вестник МЭИ. 2012. №5.
16. Дорошин А. Н. Многофакторный анализ эффективности энергокомплексов на основе возобновляемых источников энергии для энергообеспечения автономного потребителя / А. Н. Дорошин, В. И. Виссарионов, Н. К. Малинин // Вестник МЭИ. 2011. №2. С. 45–53.
17. Бутузов В. А. Гелиоустановки Краснодарского края / В. А. Бутузов, Е. В. Брянцева, И. С. Гнатюк // Промышленная энергетика. 2011. №7. С. 45–47.
18. Бутузов В. А. Повышение эффективности систем теплоснабжения на основе возобновляемых источников энергии : дис. на соискание уч. ст. д. т. н. / В. А. Бутузов. М. : ВИЭСХ, 2004. 297 с.
19. Велькин В. И. Опыт использования вакуумных солнечных коллекторов для многоэтажного дома в мегаполисе / В. И. Велькин, В. Ю. Данилов // Альтернативная энергетика и экология. Саров. 2012. №11. С. 24–27.
20. Попель О. С. Исследование и разработка систем энергоснабжения с использованием возобновляемых источников энергии : дис. на соискание уч. ст. д.т.н. / О. С. Попель. М., 2007.

21. Калашян М. С. Экспериментальный жилой дом с системой солнечного теплоснабжения в пос. Мерцаван Арм. ССР / М. С. Калашян, О. С. Попель, Э. Э. Шпильрайн // Гелиотехника. 1986. №3. С. 66–71.
22. Калашян М. С. Результаты испытаний системы солнечных коллекторов на экспериментальном жилом доме / М. С. Калашян, О. С. Попель, С. Е. Фрид // Гелиотехника. 1986. №4. С. 69–73.
23. Калашян М. С. Результаты длительной эксплуатации и технико-экономические показатели системы солнечного теплоснабжения индивидуального жилого дома / М. С. Калашян, О. С. Попель, Э. Э. Шпильрайн // Теплоэнергетика. 1987. №9. С. 30–33.
24. Сидельников А. И. Разработка методики технико-экономического обоснования структуры и параметров энергокомплекса на базе возобновляемых источников энергии : дис. на соискание уч. ст. к.т.н. / А. И. Сидельников. М., 2003.
25. Сидельников А. И. Результаты компьютерного моделирования совместной работы ВЭС, СЭС и ГЭС в составе энергокомплекса и на локального потребителя / А. И. Сидельников // XI Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» : тез. докл. М. : МЭИ, 2003. С. 333–334.
26. Бреусов В. П. Потенциал возобновляемых источников энергии в Казахстане / В. П. Бреусов, Д. А. Кариев, М. А. Ташимбетов // Возобновляемая энергетика – 2003: состояние, проблемы, перспективы : сб. докладов межд. научн.-практ. конф. СПб. : Изд-во СПбГТТУ, 2003. 616 с. (С. 458–464).
27. Бреусов В. П. Комбинированное использование возобновляемых источников энергии – рациональное направление энергоресурсосберегающей политики в республике Казахстан / В. П. Бреусов, М. А. Ташимбетов // Промышленная энергетика. М., 2004. №11. С. 53–55.
28. Шерьязов С. К. Выбор рационального сочетания традиционных и возобновляемых энергоресурсов в системе энергоснабжения сельскохозяйственных потребителей (на примере Челябинской области) / С. К. Шерьязов. Челябинск, 2010. 40 с.

29. Шерьязов С. К. Возобновляемые источники в системе энерго-снабжения сельскохозяйственных потребителей : монография / С. К. Шерьязов. Челябинск : ЧГАУ, 2008. 300 с.
30. Об опыте Свердловской области по внедрению возобновляемых источников энергии / В. П. Штагер, С. Е. Щеклеин, В. И. Велькин, Г. В. Тягунов // Энергетика региона. Екатеринбург, 2003. №3.
31. Опыт УГТУ по реализации проекта энергообеспечения удаленного объекта нетрадиционными и возобновляемыми источниками энергии / С. Е. Щеклеин, В. И. Велькин, Г. В. Тягунов // Тезисы докладов отчетной конференции по программе «Топливо и энергетика». М. : МЭИ, 2001.
32. Лапин Ю. Н. Энергоэффективные здания для села из местных строительных материалов / Ю. Н. Лапин // Научные труды ВИЭСХ. М. : ВИЭСХ, 2004. Т. 90.
33. DIN EN 13187-1999 Thermal performance of buildings – Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes – Infrared method (ISO 6781:1983, modified); German version EN 13187:1998.
34. СНиП 23-02-2003 Тепловая защита зданий / Постановление Госстроя России от 26.06.2003" . №113. М., 2011.
35. СНиП II-3-79* Строительная теплотехника / Постановление Минстроя России. М., 1995.
36. ТСН 23-301-2004. Энергетическая эффективность жилых и общественных зданий. Нормы по энергопотреблению и теплозащите / НИИ строительной физики РААСН. М., 2004.
37. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий / НИИ строительной физики РААСН. М., 2004.
38. Данилов Н. И. Возобновляемая энергетика и электрификация удаленных районов / Н. И. Данилов, С. Е. Щеклеин, В. И. Велькин // Всероссийский симпозиум «Безопасность биосферы». Екатеринбург : УГТУ, 2000.
39. Велькин В. И. Оптимизация выбора энергообеспечения на основе кластерного подхода в использовании возобновляемых источников энергии / В. И. Велькин // Альтернативная энергетика и экология. 2012. №2. С. 67–71.

40. Миркин Б. Г. Геометрическая интерпретация критериев кластер-анализа / Б. Г. Миркин, И. Б. Мучник // Методы анализа мономерных экономических данных. Новосибирск : Наука, 1981. С. 3–11.
41. Tobin J. The Teory of Portfolio Selection / J. Tobin // F. H. Hahn and F. R. P. Brechling (eds). The Teory of Interest Rate. London : Macmillan, 1965. P. 3–51.
42. Свидетельство о Гос. регистрации программы для ЭВМ №2013613097, Программа Автоматизированного расчета кластера ВИЭ «АРК-ВИЭ» / В. И. Велькин, М. И. Логинов, Е. В. Чернобай. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 25 марта 2013 г.
43. Модульная ветроэнергетическая установка с тихоходным генератором приземного расположения / В. И. Велькин, В. А. Дмитриевский, В. А. Прахт, А. И. Якимов, Ю. И. Якимов // Энергобезопасность и энергосбережение. 2012. №6. С. 28–31.
44. Графический анализ экспериментальных данных и результатов математической модели кластеров ВИЭ / В. И. Велькин, С. Е. Щеклеин, М. И. Логинов, Е. В. Чернобай // Альтернативная энергетика и экология. 2013. №2. С. 131–136.
45. Велькин В. И. Выбор оптимального состава оборудования в кластере возобновляемых источников энергии на основе регрессионного анализа / В. И. Велькин, М. И. Логинов // Альтернативная энергетика и экология. 2012. №3. С. 100–104.

Научное издание

Велькин Владимир Иванович

**ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ УДАЛЕННОГО ОБЪЕКТА
НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ КЛАСТЕРА ВИЭ**

Редактор *Н. П. Кубыщенко*

Компьютерная верстка *Т. С. Кринициной*

Подписано в печать 09.08.2013. Формат 60×90 1/16.
Бумага писчая. Плоская печать. Усл. печ. л. 6,25.
Уч.-изд. л. 5,0. Тираж ____ экз. Заказ ____.

Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5
E-mail: rio@ustu.ru

" УрФУ
620004, Екатеринбург, ул. , 3;

Для заметок